

**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID  
ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR**



**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

***“Estudio del impacto de un  
vehículo sobre señales de  
tráfico mediante LS-Dyna”***

**PROYECTO FIN DE CARRERA  
Ingeniería Técnica Industrial: Mecánica**

Autor:

**D. DANIEL BECERRIL NIETO**

Tutor:

**Dra. D<sup>a</sup>. BEATRIZ LÓPEZ BOADA**

**JUNIO 2010**



## ÍNDICE

|  | Pagina |
|--|--------|
| 1. INTRODUCCIÓN.....                           | 10     |
| 1.1. OBJETIVO .....                            | 11     |
| 1.2. ESTRUCTURA DEL PROYECTO .....             | 12     |
| 2. SEGURIDAD EN LOS VEHÍCULOS .....            | 14     |
| 2.1. SEGURIDAD PASIVA.....                     | 15     |
| 2.1.1. CINTURONES DE SEGURIDAD .....           | 15     |
| 2.1.2. AIRBAGS.....                            | 16     |
| 2.1.3. ASIENTOS Y REPOSACABEZAS .....          | 17     |
| 2.1.4. CHASIS Y CARROCERÍA .....               | 18     |
| 2.2. SEGURIDAD ACTIVA.....                     | 19     |
| 2.2.1. SISTEMA DE FRENOS .....                 | 19     |
| 2.2.2. DIRECCIÓN .....                         | 20     |
| 2.2.3. SUSPENSIÓN.....                         | 20     |
| 2.2.4. NEUMÁTICOS .....                        | 21     |
| 2.2.5. ILUMINACIÓN .....                       | 21     |
| 2.2.6. SISTEMA DE CONTROL DE ESTABILIDAD ..... | 22     |
| 2.2.7. OTROS SISTEMAS DE AYUDA .....           | 23     |
| 3. IMPACTOS EN EURO NCAP.....                  | 25     |
| 3.1. CALIFICACIONES EURO NCAP.....             | 28     |
| 3.2. IMPACTO FRONTAL.....                      | 29     |
| 3.3. IMPACTO LATERAL .....                     | 33     |
| 3.4. IMPACTO LATERAL CONTRA POSTE .....        | 36     |
| 4. EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....         | 40     |
| 4.1. PRINCIPIOS BÁSICOS Y APLICACIONES.....    | 41     |
| 4.2. LS-DYNA.....                              | 43     |
| 5. MODELOS EMPLEADOS EN LA SIMULACIÓN .....    | 46     |
| 5.1. VEHÍCULO A: CHEVROLET .....               | 48     |
| 5.1.1. GEOMETRÍA.....                          | 48     |
| 5.1.2. MATERIALES.....                         | 50     |



|        |   |    |
|--------|---|----|
| 5.1.3. | VELOCIDAD .....   | 52 |
| 5.1.4. | GRAVEDAD.....   | 53 |
| 5.1.5. | ACELERÓMETROS .....   | 54 |
| 5.2.   | VEHÍCULO B: DODGE .....   | 55 |
| 5.2.1. | GEOMETRÍA.....  | 56 |
| 5.2.2. | MATERIALES .....  | 57 |
| 5.2.3. | VELOCIDAD .....   | 59 |
| 5.2.4. | GRAVEDAD.....   | 61 |
| 5.2.5. | ACELERÓMETROS .....   | 61 |
| 5.3.   | SEÑAL VERTICAL PEQUEÑA.....   | 62 |
| 5.3.1. | GEOMETRÍA.....  | 64 |
| 5.3.2. | MATERIALES .....  | 65 |
| 5.4.   | SEÑAL VERTICAL GRANDE.....  | 66 |
| 5.4.1. | GEOMETRÍA.....  | 67 |
| 5.4.2. | MATERIALES .....  | 69 |
| 5.5.   | CONTACTOS .....   | 70 |
| 5.5.1. | CONTACTO VEHÍCULO – SEÑAL .....                                     | 71 |
| 5.5.2. | CONTACTO VEHÍCULO Y SENAL - SUELO .....                             | 71 |
| 6.     | NORMA EUROPEA EN 1317 .....   | 72 |
| 7.     | RESULTADOS .....  | 76 |
| 7.1.   | CASO A: CHOQUE FRONTAL DEL VEHÍCULO A CONTRA LA SEÑAL PEQUEÑA ..... | 77 |
| 7.2.   | CASO B: CHOQUE FRONTAL DEL VEHÍCULO B CONTRA LA SEÑAL PEQUEÑA ..... | 82 |
| 7.3.   | CASO C: CHOQUE FRONTAL DEL VEHÍCULO A CONTRA LA SEÑAL GRANDE .....  | 85 |
| 7.4.   | CASO D: CHOQUE FRONTAL DEL VEHÍCULO B CONTRA LA SEÑAL GRANDE .....  | 89 |
| 7.5.   | CASO E: CHOQUE LATERAL DEL VEHÍCULO A CONTRA LA SEÑAL PEQUEÑA ..... | 92 |
| 7.6.   | CASO F: CHOQUE LATERAL DEL VEHÍCULO B CONTRA LA SEÑAL PEQUEÑA ..... | 97 |



|      |   |     |
|------|---|-----|
| 7.7. | CASO G: COCHE LATERAL DEL VEHÍCULO A CONTRA LA SEÑAL GRANDE ..... | 101 |
| 7.8. | CASO H: COCHE LATERAL DEL VEHÍCULO B CONTRA LA SEÑAL GRANDE ..... | 104 |
| 7.9. | COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS .....                     | 108 |
| 8.   | CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....                             | 110 |
| 9.   | REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....                                  | 112 |



## **ÍNDICE DE FIGURAS**

|   | Pagina |
|---|--------|
| <i>Figura 1: Diferencia entre colisión con cinturón y sin cinturón. ....</i>      | 16     |
| <i>Figura 2: Distribución de los Airbags. ....</i>                                | 17     |
| <i>Figura 3: Movimiento del conductor en una colisión posterior. ....</i>         | 18     |
| <i>Figura 4: Comportamiento del reposacabezas en función de la posición. ....</i> | 18     |
| <i>Figura 5: Estructura del vehículo. ....</i>                                    | 19     |
| <i>Figura 6: Acción del ESP ante subviraje y sobreviraje. ....</i>                | 23     |
| <i>Figura 7: Impacto frontal. ....</i>  | 30     |
| <i>Figura 8: Evaluación ocupantes delanteros. ....</i>                            | 31     |
| <i>Figura 9: Impacto lateral. ....</i>  | 34     |
| <i>Figura 10: Impacto latera contra poste. ....</i>                               | 37     |
| <i>Figura 11: Sistema de programación del MEF. ....</i>                           | 42     |
| <i>Figura 12: Impacto real y simulación del impacto. ....</i>                     | 44     |
| <i>Figura 13: Coordenadas de la simulación. ....</i>                              | 47     |
| <i>Figura 14: Chevrolet C2500 Pickup. ....</i>                                    | 48     |
| <i>Figura 15: Estructura del Chevrolet C2500 Pickup. ....</i>                     | 49     |
| <i>Figura 16: Localización de los acelerómetros en el Chevrolet C2500. ....</i>   | 55     |
| <i>Figura 17: Dodge Neon. ....</i>  | 55     |
| <i>Figura 18: Estructura del Dodge Neon. ....</i>                                 | 56     |
| <i>Figura 19: Localización de los acelerómetros en el Dodge Neon. ....</i>        | 62     |
| <i>Figura 20: zona urbana de señalización. ....</i>                               | 63     |
| <i>Figura 21: 4lb./ft. U-Post. ....</i>   | 63     |
| <i>Figura 22: 4lb./ft. U-Post acotada. ....</i>                                   | 64     |
| <i>Figura 23: (1) Discontinuidad del poste. (2) Perfil acotado. ....</i>          | 65     |



|   |           |
|---|-----------|
| <i>Figura 24: 8" × 8" Oregon Slip Base. ....</i>                      | <i>67</i> |
| <i>Figura 25: 8" × 8" Oregon Slip Base acotada.....</i>               | <i>68</i> |
| <i>Figura 26: Sistema de sujeción. ....</i>                           | <i>69</i> |
| <i>Figura 27: Secuencia del impacto frontal, Caso A. ....</i>         | <i>77</i> |
| <i>Figura 28: Gráfica de velocidad en dirección x, Caso A.....</i>    | <i>78</i> |
| <i>Figura 29: Gráfica de aceleración en dirección x, Caso A. ....</i> | <i>79</i> |
| <i>Figura 30: Gráfica de velocidad en dirección y, Caso A.....</i>    | <i>80</i> |
| <i>Figura 31: Gráfica de velocidad en dirección z, Caso A.....</i>    | <i>81</i> |
| <i>Figura 32: Secuencia del impacto frontal, Caso B. ....</i>         | <i>82</i> |
| <i>Figura 33: Gráfica de velocidad en dirección x, Caso B.....</i>    | <i>83</i> |
| <i>Figura 34: Gráfica de aceleración en dirección x, Caso B. ....</i> | <i>84</i> |
| <i>Figura 35: Secuencia del impacto frontal, Caso C.....</i>          | <i>86</i> |
| <i>Figura 36: Gráfica de velocidad en dirección x, Caso C. ....</i>   | <i>87</i> |
| <i>Figura 37: Gráfica de aceleración en dirección x, Caso C. ....</i> | <i>87</i> |
| <i>Figura 38: Secuencia del impacto frontal, Caso D.....</i>          | <i>89</i> |
| <i>Figura 39: Gráfica de velocidad en dirección x, Caso D. ....</i>   | <i>90</i> |
| <i>Figura 40: Gráfica de aceleración en dirección x, Caso D.....</i>  | <i>91</i> |
| <i>Figura 41: Secuencia del impacto lateral, Caso E. ....</i>         | <i>93</i> |
| <i>Figura 42: Gráfica de velocidad en dirección y, Caso E.....</i>    | <i>94</i> |
| <i>Figura 43: Gráfica de aceleración en dirección y, Caso E. ....</i> | <i>94</i> |
| <i>Figura 44: Gráfica de velocidad en dirección x, Caso E.....</i>    | <i>96</i> |
| <i>Figura 45: Gráfica de velocidad en dirección z, Caso E.....</i>    | <i>96</i> |
| <i>Figura 46: Secuencia del impacto lateral, Caso F. ....</i>         | <i>98</i> |
| <i>Figura 47: Gráfica de velocidad en dirección y, Caso F.....</i>    | <i>99</i> |
| <i>Figura 48: Gráfica de aceleración en dirección y, Caso F. ....</i> | <i>99</i> |



|  |     |
|--|-----|
| <i>Figura 49: Secuencia del impacto lateral, Caso G.</i> .....         | 101 |
| <i>Figura 50: Gráfica de velocidad en dirección y, Caso G.</i> .....   | 102 |
| <i>Figura 51: Gráfica de aceleración en dirección y, Caso G.</i> ..... | 103 |
| <i>Figura 52: Secuencia del impacto lateral, Caso H.</i> .....         | 105 |
| <i>Figura 53: Gráfica de velocidad en dirección y, Caso H.</i> .....   | 106 |
| <i>Figura 54: Gráfica de aceleración en dirección y, Caso H.</i> ..... | 106 |



## ÍNDICE DE TABLAS

|   | Pagina    |
|---|-----------|
| <i>Tabla 1: Canales a medir en el impacto frontal.....</i>                  | <i>33</i> |
| <i>Tabla 2: Canales a medir en el impacto lateral.....</i>                  | <i>36</i> |
| <i>Tabla 3: Canales a medir en el impacto lateral contra poste.....</i>     | <i>39</i> |
| <i>Tabla 4: Unidades en los modelos de simulación.....</i>                  | <i>47</i> |
| <i>Tabla 5: Características generales del Chevrolet C2500 Pickup.....</i>   | <i>49</i> |
| <i>Tabla 6: Picewise Linear Plasticity I Chevrolet.....</i>                 | <i>50</i> |
| <i>Tabla 7: Picewise Linear Plasticity II Chevrolet.....</i>                | <i>50</i> |
| <i>Tabla 8: Picewise Linear Plasticity III Chevrolet.....</i>               | <i>50</i> |
| <i>Tabla 9: Picewise Linear Plasticity IV Chevrolet.....</i>                | <i>51</i> |
| <i>Tabla 10: Rigid I Chevrolet.....</i>                                     | <i>51</i> |
| <i>Tabla 11: Rigid II Chevrolet.....</i>                                    | <i>51</i> |
| <i>Tabla 12: Rigid III Chevrolet.....</i>                                   | <i>51</i> |
| <i>Tabla 13: Coordenadas de rotación de los neumáticos.....</i>             | <i>53</i> |
| <i>Tabla 14: Localización de los acelerómetros del Chevrolet C2500.....</i> | <i>54</i> |
| <i>Tabla 15: Características generales del Dodge Neon.....</i>              | <i>57</i> |
| <i>Tabla 16: Picewise Linear Plasticity I Dogde.....</i>                    | <i>58</i> |
| <i>Tabla 17: Picewise Linear Plasticity II Dogde.....</i>                   | <i>58</i> |
| <i>Tabla 18: Picewise Linear Plasticity III Dogde.....</i>                  | <i>58</i> |
| <i>Tabla 19: Picewise Linear Plasticity IV Dogde.....</i>                   | <i>58</i> |
| <i>Tabla 20: Rigid I Dogde.....</i>   | <i>59</i> |
| <i>Tabla 21: Rigid II Dogde.....</i>  | <i>59</i> |
| <i>Tabla 22: Coordenadas de rotación de los neumáticos.....</i>             | <i>60</i> |
| <i>Tabla 23: Localización de los acelerómetros del Dodge Neon.....</i>      | <i>61</i> |





|   |            |
|---|------------|
| <i>Tabla 24: Picewise Linear Plasticity Poste, señal vertical pequeña. ....</i> | <i>65</i>  |
| <i>Tabla 25: Elastic Panel, señal vertical pequeña. ....</i>                    | <i>66</i>  |
| <i>Tabla 26: Honeycomb Hormigón, señal vertical pequeña. ....</i>               | <i>66</i>  |
| <i>Tabla 27: Picewise Linear Plasticity Poste, señal vertical grande. ....</i>  | <i>69</i>  |
| <i>Tabla 28: Picewise Linear Plasticity I señal vertical grande. ....</i>       | <i>69</i>  |
| <i>Tabla 29: Elastic I señal vertical grande. ....</i>                          | <i>70</i>  |
| <i>Tabla 30: Elastic II señal vertical grande. ....</i>                         | <i>70</i>  |
| <i>Tabla 31: Índice de severidad de la aceleración. ....</i>                    | <i>74</i>  |
| <i>Tabla 32: Resultados de los casos, Índice ASI. ....</i>                      | <i>108</i> |



# **1. INTRODUCCIÓN**

En el año 2009, en España, hubo 1.897 víctimas mortales en accidentes de tráfico en las carreteras, no se incluyeron por tanto los de la zona urbana, considerándose víctima mortal aquella que fallece dentro de las 24 horas siguientes al accidente. En el 2009, se ha tenido un promedio diario de víctimas mortales de 5,2. Si se compara este resultado con el obtenido en 2003, se ha pasado de tener 11 muertos diarios en las carreteras españolas a tener 5,2 fallecidos diarios, es decir, 6 muertos menos cada día por los 365 días del año. Aun así, es posible y se debe reducir más el número de víctimas de accidentes de tráfico. Para ello, a parte de campañas de concienciación, información y prevención, es necesario hacer una fuerte apuesta por los sistemas de seguridad en los vehículos [1].

Es importante saber el tipo de accidentes que se producen en las carreteras y las lesiones que producen en sus ocupantes, y a partir de estos datos realizar un estudio para evitar dichos accidentes y minimizar las lesiones producidas. En el 2009, la salida de la vía fue el accidente mortal más frecuente con 791 fallecidos. Le seguía la colisión frontal con 358 fallecidos y la colisión fronto-lateral con 282 fallecidos. El resto de accidentes fueron: atropello a peatón (171), colisión múltiple y por alcance (123), otros tipos de accidentes (95), colisión lateral (43) y vuelco del vehículo (34). Por esta razón, es importante que las señales de tráfico, como las barreras que se encuentran en las cunetas



de las carreteras, no produzcan lesiones a los conductores debido a una salida de la vía. De esta forma se reduce considerablemente el número de fallecidos en las carreteras españolas.

El avance de la tecnología informática ha permitido el estudio de accidentes reales. El correcto uso de las herramientas permite predecir los resultados de un acontecimiento real. Gracias a estas herramientas se ha conseguido una reducción de costes de pruebas y la capacidad de adelantarse a situaciones no deseables. El método de los elementos finitos es hoy en día el procedimiento más potente para el análisis de estructuras de carácter uni, bi o tridimensional sometidas a las acciones exteriores más diversas. En este proyecto se emplea el LS-Dyna para procesar la simulación de los impactos laterales y frontales contra las señales de tráfico. Se ha utilizado LS-PrePost para implementar el modelo y visualizar los resultados. Livermore Software Technology Corporation tiene una gran especialización en el sector automovilístico, más en concreto, en términos de seguridad ante situaciones de impacto [2].

## **1.1. OBJETIVO**

El objetivo de este proyecto es valorar los daños producidos en los ocupantes de dos vehículos diferentes debido al impacto frontal y lateral contra señales de tráfico. Los dos vehículos utilizados son uno de tipo turismo y el otro de tipo todo-terreno. Los impactos son simulados mediante LS-PrePost, un programa tridimensional elaborado por LSTC. Se realizan ocho simulaciones, en las cuales, los dos vehículos utilizados impactan frontal y lateralmente contra dos tipos de señales de tráfico. La diferencia entre las señales son el grosor del poste y el sistema de sujeción con el suelo. Para conseguir una comparativa objetiva entre los dos vehículos, se aplicará la norma europea EN 1317, en concreto, el índice ASI (Acceleration Severity Index). Esta norma aporta una idea sobre la severidad de los diferentes impactos en los ocupantes.

Tanto los vehículos utilizados en el proyecto como las señales de tráfico han sido realizados por NCAC (Nacional Crash Analysis Center). Los modelos se encuentran en su web disponible a todo el público gratuitamente.



Por ultimo, mencionar que no es objetivo de este proyecto el análisis del diseño estructural de las señales y de los vehículos, sino de realizar las condiciones de contorno necesarios, fijando la velocidad y estableciendo los diferentes contactos entre las superficies, para obtener los resultados de los impactos y que éstos reflejen con la mayor fidelidad posible una situación real. De esta forma, justificar la eficacia de estas simulaciones en el campo de la seguridad de los vehículos.

## **1.2. ESTRUCTURA DEL PROYECTO**

El proyecto está dividido en varios capítulos que son descritos a continuación.

En el segundo y tercer capítulo, SEGURIDAD EN LOS VEHÍCULOS E IMPACTOS EN EURO NCAP, se hace un planteamiento del estado del arte. En el capítulo segundo se describen los elementos de la seguridad activa y pasiva que son conceptos generales de la seguridad vial. En el tercer capítulo se especifica los diferentes ensayos de choque que se realizan en el sector del automóvil y la organización EURO NCAP que se encarga de realizarlos.

En el capítulo cuarto, EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS, se hace una introducción breve al método de los elementos finitos, en la cual se basa los programas utilizados en las simulaciones del proyecto. A continuación se describe los programas LS-Dyna y LS-PrePost.

En el capítulo quinto, MODELOS EMPLEADOS EN LA SIMULACIÓN, se describen las características generales como las geometrías y las materiales de los elementos utilizados en las simulaciones del proyecto. En este capítulo también se especifican los contactos elegidos para cada situación.

En el capítulo sexto, NORMA EUROPEA EN 1317, se describe la norma europea que analiza la deceleración que sufre los ocupantes mediante el índice ASI. A través del índice ASI se puede determinar la gravedad de cada impacto. Gracias a este índice se puede comparar la gravedad de los impactos en cada vehículo.



En el capítulo séptimo, RESULTADOS, se plantean los ocho casos simulados exponiendo los resultados obtenidos en cada uno de los casos y haciendo una valoración de cada uno. Por último se compara los resultados obtenidos en cada caso.

En el capítulo octavo, CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS, se obtienen conclusiones de los resultados extraídos de las situaciones y se proponen trabajos futuros relacionados con el proyecto realizado.



## **2. SEGURIDAD EN** **LOS VEHÍCULOS**

A lo largo del año se producen accidentes de tráfico con muertos, heridos y pérdidas materiales. Tras la aparición de los accidentes se ha producido una importante inversión para evitar estos y las lesiones a los ocupantes. Se han creado laboratorios que sólo se dedican a mejorar la seguridad de los automóviles y los propios fabricantes de los automóviles someten a sus automóviles a pruebas específicas para mejorar su seguridad [3].

Dentro de la seguridad en los automóviles hay que diferenciar dos temas: seguridad pasiva y seguridad activa. La seguridad activa son todos los elementos del automóvil que mejoran la seguridad en la conducción y la seguridad pasiva son todos los elementos del automóvil que en caso de accidente evitan o disminuyen los daños a los ocupantes como el entorno del accidente.



## **2.1. SEGURIDAD PASIVA**

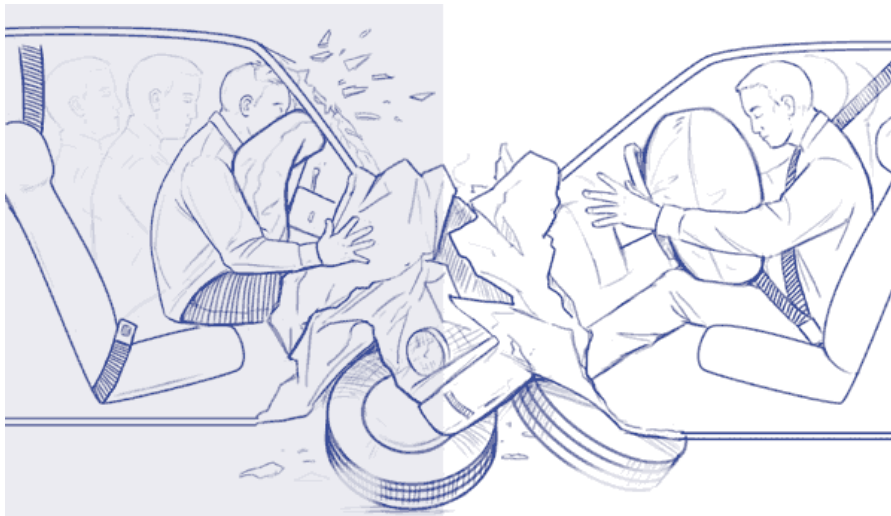
Un vehículo antes de la colisión tiene una energía cinética debido a la velocidad. Cuando el vehículo colisiona toda la energía cinética se transforma en energía de deformación que es absorbida mayoritariamente por la carrocería del vehículo. Los ocupantes del vehículo en el momento de la colisión también absorben parte de esa energía cinética. Esta energía les hace moverse en sentido de la marcha y, por lo tanto, les hace chocar con la zona que tienen enfrente. Para evitar que los ocupantes no tengan ningún tipo de lesión cuando se produce la colisión, los fabricantes han desarrollado elementos que dan lugar a lo que se denomina seguridad pasiva [4].

Cuando las velocidades son bajas los principales interventores son los parachoques. Pero cuando las velocidades aumentan intervienen más dispositivos como los cinturones de seguridad y los airbags.

### **2.1.1. CINTURONES DE SEGURIDAD**

Los cinturones de seguridad evitan que los ocupantes del vehículo se desplacen del asiento en el momento de la colisión, de esta forma se evita que puedan colisionar con la carrocería o asientos e incluso puedan salir despedidos del vehículo. En la actualidad todos los vehículos vienen dotados en todos los asientos con cinturones de seguridad [4].

En 1953, Porsche fue el primero en instalar en alguno de sus vehículos un modelo parecido a los cinturones de seguridad actuales. En 1959 Volvo daba la posibilidad de instalar los cinturones de seguridad. Estos cinturones eran de dos puntos y se ajustaban manualmente. A lo largo de los años se han mejorado considerablemente los cinturones, en la actualidad los cinturones de seguridad en los vehículos convencionales son de tres puntos para evitar la separación de las vértebras. En la figura 1 se muestra la diferencia entre una colisión con cinturón de seguridad y sin cinturón de seguridad.



*Figura 1: Diferencia entre colisión con cinturón y sin cinturón.*

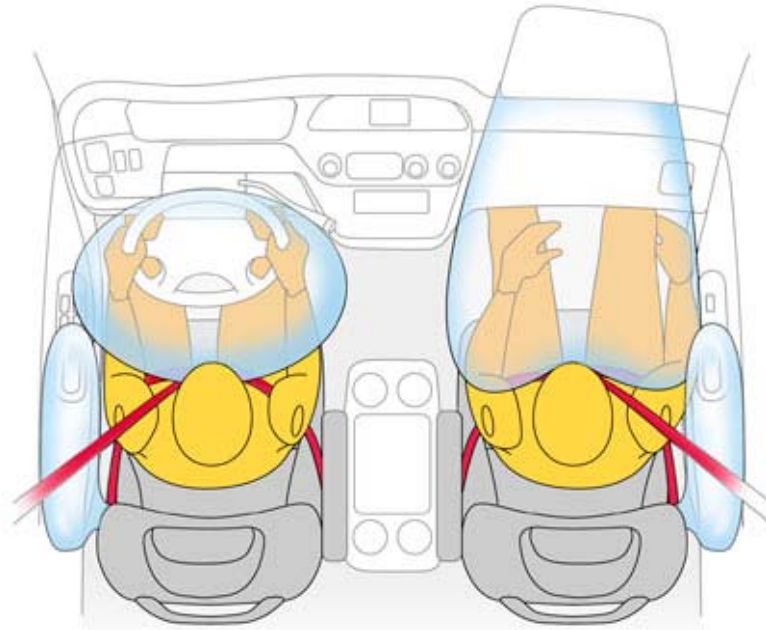
En el cinturón de seguridad se han introducido dos dispositivos que mejoran la seguridad de los ocupantes. Un carrete inercial que garantiza que el ocupante tenga el cinturón de seguridad ajustado y un tensor que, en el momento de la colisión, ajusta el cinturón de seguridad sobre el ocupante sujetándolo sobre el asiento.

### **2.1.2. AIRBAGS**

Es un elemento complementario a la acción del cinturón de seguridad. La misión es evitar que la cabeza del conductor colisione con el volante o con la luna delantera. En la actualidad el airbag también se instala para el copiloto, evitando que colisione con la luna delantera o el salpicadero. En algunos vehículos se pueden instalar airbags laterales para evitar la colisión con las ventanas laterales o en caso de un impacto lateral con un poste evitando la colisión con la cabeza [4].

Para que funcione correctamente, el ocupante tiene que tener el cinturón de seguridad colocado correctamente para evitar que se produzcan daños al ocupante. Estos daños pueden ser leves rozaduras faciales hasta lesiones graves. En la figura 2 se muestra la distribución de los airbag en un automóvil.





*Figura 2: Distribución de los Airbags.*

### **2.1.3. ASIENTOS Y REPOSACABEZAS**

Los asientos tienen la misión de sujetar los ocupantes del vehículo, de esta forma se reduce los movimientos y las aceleraciones. Los asientos retienen al ocupante para garantizar que no choque con el interior del vehículo. Al principio los asientos no tenían reposacabezas, por lo que se producían muchas muertes por desnucamiento causadas por el rebote del cuerpo al producirse un accidente por alcance. Para evitar estas lesiones se tiene que hacer coincidir el centro del reposacabezas con el centro de gravedad de la cabeza. En la figura 3 se muestra el movimiento de un ocupante en el caso de una colisión posterior y en la figura 4 se muestra el comportamiento del reposacabezas en función de la posición. [5].

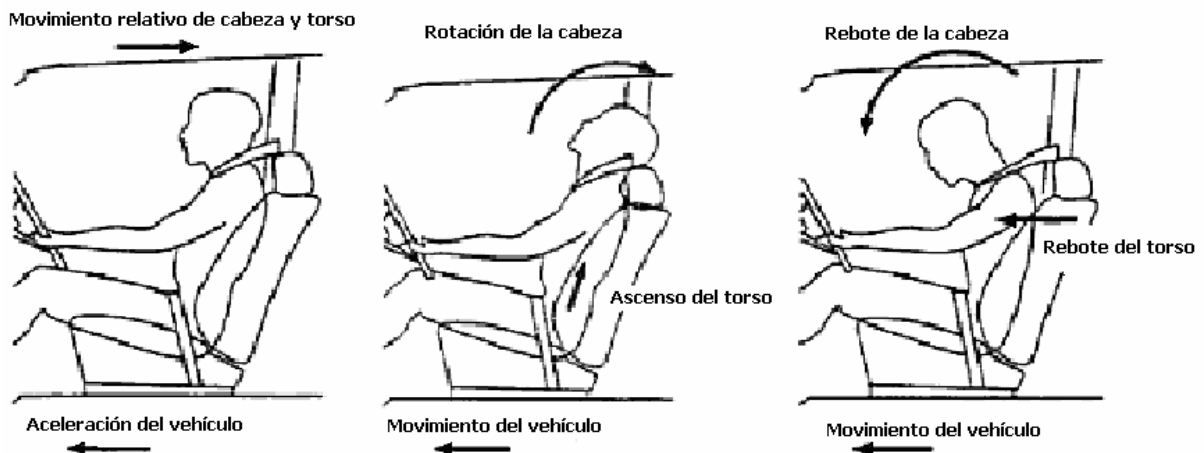


Figura 3: Movimiento del conductor en una colisión posterior.

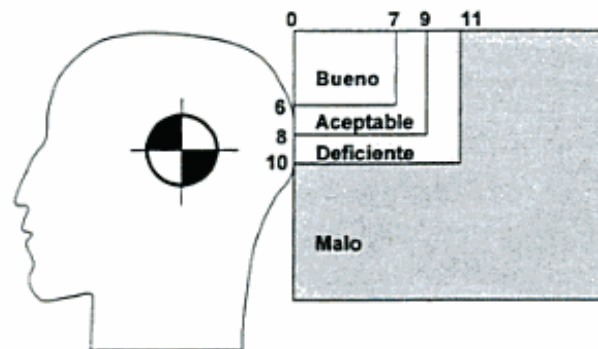
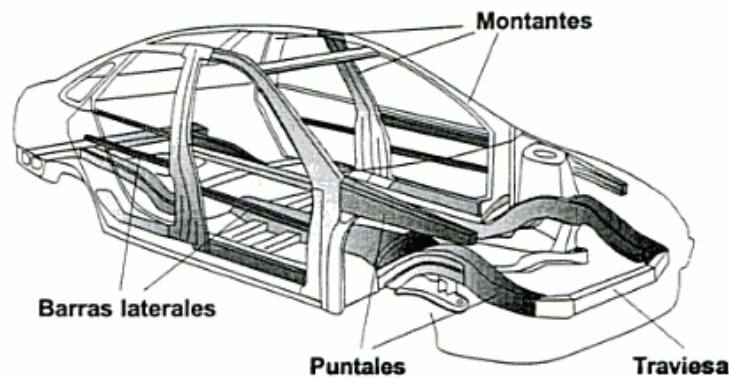


Figura 4: Comportamiento del reposacabezas en función de la posición.

## 2.1.4. CHASIS Y CARROCERÍA

Los primeros vehículos se fabricaban con un chasis metálico sin haber tenido en cuenta las deformaciones por causa de un accidente. En la actualidad la estructura de los vehículos es monocasco autoportante donde se crea un espacio seguro formado por los montantes, barreras laterales, puntales y traviesas. Este espacio tiene que permanecer íntegro para garantizar la supervivencia de los ocupantes en el accidente. En la figura 5 se muestra la estructura monocasco autoportante a partir de la cual se monta la carrocería del vehículo. Se intenta que en el momento de la colisión la energía se disipe mediante fricción o por deformación de los elementos de absorción de la estructura. Los fabricantes intentan que las deformaciones se produzcan en función de los esfuerzos producidos en la colisión [5].



*Figura 5: Estructura del vehículo.*

## **2.2. SEGURIDAD ACTIVA**

La seguridad activa está formada por aquellos elementos que están instalados en el vehículo para garantizar su seguridad en los desplazamientos. Estos elementos pueden ser los frenos ABS que mejoran el sistema de frenado, el control de estabilidad ESP que evita el derrape del automóvil mediante un programa electrónico que controla el sistema de frenado y la suspensión activa que ajusta su acción a la superficie del pavimento. A continuación se explican algunos de los dispositivos de la seguridad activa [4].

### **2.2.1. SISTEMA DE FRENOS**

El sistema de frenado es donde se realizan las fuerzas necesarias que se oponen al movimiento del vehículo, pudiendo ser de diferentes tipos: de fricción, eléctrico y de fluido. La introducción de los frenos surgió por la necesidad de adaptación del mismo a las condiciones de deceleración exigidas por la calzada y las situaciones posibles [5].

En los vehículos convencionales se usan los de fricción, donde las fuerzas se generan por rozamiento entre dos elementos. Una de los elementos es un material de fricción con una alto coeficiente de rozamiento y resistente a la abrasión. Se utilizan frenos de tambor o de disco. Los frenos de disco son los más utilizados gracias a que disipan mejor el calor, debido a que el disco se encuentra al aire libre.



Cuando se bloquean las ruedas se produce una situación peligrosa, debido a que se limita la capacidad de control del vehículo para el conductor. Se produce una pérdida de estabilidad y un derrape del vehículo, por lo tanto, se aumenta el tiempo y la distancia de frenado. Si se bloquean las ruedas delanteras, el vehículo circula en línea recta dejando inutilizable la dirección, si al contrario, se produce el bloqueo en las ruedas traseras, la zona trasera del vehículo tiende a desplazarse lateralmente.

El sistema ABS dosifica la frenada según las condiciones de adherencia de cada rueda con el asfalto, de esta forma nunca se bloquean las ruedas. Con el sistema ABS el conductor puede controlar el coche en todo momento ya que no se producirá una pérdida de dirección y de estabilidad del vehículo.

### **2.2.2. DIRECCIÓN**

La dirección en los últimos años ha tenido un gran impulso. Se creó la servodirección, la cual reduce la fuerza que necesita el conductor para girar el volante. Cuando aumenta la velocidad del vehículo la dirección se endurece. En la actualidad, se está introduciendo la dirección con asistencia eléctrica. El sistema de la dirección consigue que el conductor sienta el alto grado de adherencia entre los neumáticos y la calzada, de esta forma se consigue una alta seguridad [4].

### **2.2.3. SUSPENSIÓN**

La suspensión en el automóvil tiene el objetivo de mantener las ruedas en contacto con el suelo en todo momento para seguridad de los ocupantes y evitar que se produzcan aceleraciones verticales mayores a la aceleración de la gravedad. También tienen el objetivo de otorgar comodidad a los ocupantes del vehículo, amortiguando y frenando las irregularidades de la calzada [4].

La suspensión activa regula la actuación de los amortiguadores, regulando la suspensión en función de las irregularidades de la calzada y la carga del vehículo. De esta forma, se garantiza una mayor seguridad y comodidad en el vehículo.



## **2.2.4. NEUMÁTICOS**

En 1898, André y Edoward Michelin instalaron por primera vez un neumático en un vehículo. Los diseños han ido mejorándose y en la actualidad todos los vehículos convencionales utilizan neumáticos. En el interior de la cubierta se llena de aire a presión, de esta forma se proporciona la rigidez deseada para que pueda soportar los esfuerzos a los que van a estar sometidos [5].

Los neumáticos tienen el objetivo de transmitir las fuerzas verticales, longitudinales y transversales entre la calzada y el vehículo. El neumático es el único elemento del vehículo que está en contacto con la calzada. Por esta razón, es importante que se use el neumático adecuado para cada vehículo. El neumático tiene que estar en buen estado y con la presión correcta para evitar un reventón y garantizar una adherencia adecuada con la calzada. El dibujo de la banda de rodadura debe evacuar el agua de la calzada para permitir el contacto entre el neumático y la carretera, evitando el fenómeno de hidroplaneo (Aguaplaning). Los neumáticos están estandarizados y deben cumplir la Directiva 92/23/CEE y su modificación 2001/43/CE [17].

## **2.2.5. ILUMINACIÓN**

El sistema de iluminación está dotado de todos los elementos luminosos que advierten de la presencia de un vehículo y de sus posibles maniobras al resto de los conductores. Estos elementos de iluminación también tienen la función de dar la iluminación necesaria al conductor cuando la iluminación exterior no es suficiente, por ejemplo cuando se circula de noche. La iluminación garantiza una mejor circulación de los vehículos.

Los conductores tienen que saber manejar el sistema de iluminación y aplicarlo correctamente para poder evitar accidentes. De esta forma, todo conductor puede saber la maniobra que va a realizar los vehículos de su alrededor y tenerlos visibles en todo momento.



## **2.2.6. SISTEMA DE CONTROL DE ESTABILIDAD**

Dentro de las posibles tipologías de accidentes están aquellas en los que una de las causas iniciales es una pérdida de control o la estabilidad direccional. Estas situaciones suelen ocurrir en trayectorias que incluyen tramos curvos. En función de las condiciones del vehículo y de la superficie de rodadura, existen ciertos límites de sollicitaciones dinámicas que pueden producir un accidente. De forma tradicional se han planteado diversas expresiones para obtener el valor de la velocidad límite de paso por una curva sin superar el límite de adherencia, que se suele denominar velocidad límite o crítica de derrape [17].

El sistema de control de estabilidad (ESP) aumenta las características del vehículo en los tres casos habituales en la conducción: frenado, aceleración y curva. Cuando el conductor pierde el control del vehículo (pérdida de adherencia con la calzada), el ESP activa los frenos individualmente y también reduce el par del motor. Este sistema está compuesto de sensores de aceleración, de velocidad y de giro del volante, además de actuadores en los frenos y un procesador que examina la dinámica del vehículo [5].

Cuando se produce una maniobra a altas velocidades o brusca pueden aparecer dos situaciones diferentes subviraje y sobreviraje, debido a la pérdida de adherencia de uno de los dos ejes con la calzada en un tramo curvo. El subviraje se produce cuando las ruedas delanteras deslizan en una curva, provocando que la trazada del vehículo sea más amplia que la realizada por el conductor. El sobreviraje se produce cuando las ruedas traseras deslizan en una curva, provocando que la trazada del vehículo sea más corta que la realizada por el conductor e incluso pudiendo provocar un trompo. En la figura 6 se muestra la acción del ESP ante subviraje y sobreviraje.

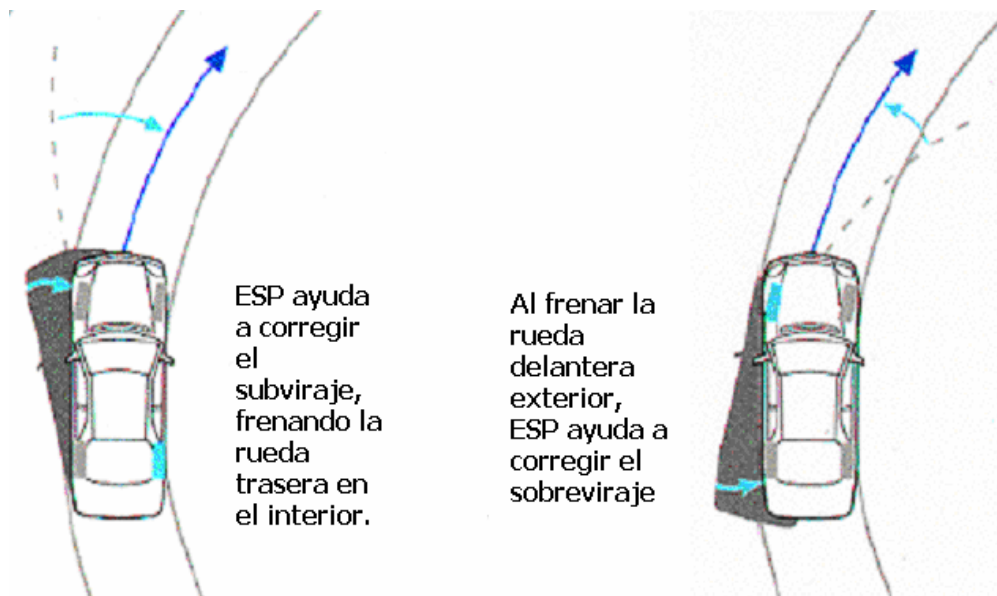


Figura 6: Acción del ESP ante subviraje y sobreviraje.

## 2.2.7. OTROS SISTEMAS DE AYUDA

Hay otros sistemas de seguridad activa que ayudan a la seguridad del vehículo como: cambio involuntario de carril, distancia con vehículo delantero, sistema electrónico de asistencia a la frenada, control de tracción, sensor de presión de los neumáticos, etc [5].

En el sistema de control de tracción TCS es muy parecido al ABS. Actúa cuando se produce una excesiva aceleración. Si la potencia en el eje motriz es superior a la del rozamiento entre la calzada y las ruedas, se produce un deslizamiento. El TCS intenta que se produzca la mejor motricidad posible entre el vehículo y el pavimento. Utiliza los elementos del sistema de frenos antibloqueo.

El sistema electrónico de asistencia a la frenada BAS interpreta la conducción del conductor. Realiza una frenada a fondo cuando interpreta una situación de emergencia, por lo tanto, se reduce la distancia de frenado. El sistema guarda líquido de freno y en el momento de la frenada provoca una sobre presión en el momento que el sistema lo necesita.



El sistema distribución automática de frenado EBD proporciona una estabilidad cuando se frena bruscamente en curva, regulando la presión del frenado de cada rueda individualmente. Utiliza los elementos del sistema de frenos antibloqueo añadiendo sensor de ángulo de dirección y controlador del motor.





### **3. IMPACTOS EN**

### **EURO NCAP**

Euro NCAP proporciona a los consumidores, ya sean los conductores como los propios fabricantes de automóviles, unos resultados realistas e independientes de seguridad de los vehículos más vendidos en Europa [3].

El objetivo de Euro NCAP es poner a disposición de los consumidores la información de la seguridad de los vehículos comparándolos con otros vehículos de características semejantes. Actúa como un incentivo para los fabricantes de automóviles para que mejoren la seguridad de sus vehículos. Euro NCAP ha demostrado tener una influencia importante en la mejora de la seguridad vial. Las pruebas de seguridad de los vehículos han conseguido la reducción de víctimas en las carreteras europeas.

Euro NCAP fue creado por el Laboratorio de Investigación del Transporte, para el Departamento de Transportes Británico. Posteriormente, otros gobiernos se han unido al programa, como Francia, Alemania, Suecia, Países Bajos, Luxemburgo y España. Muchos grupos de consumidores en Europa son miembros a través de Internacional Consumer Research and Testing. Los clubes de automóviles están representados por miembros de la FIA y por el club automovilístico alemán ADAC. La Comisión Europea



es miembro observador del consejo de Euro NCAP y ofrece su apoyo político. Este gran consorcio de miembros garantiza la independencia. Euro NCAP en sí es una asociación internacional de derecho belga.

Todos los automóviles vendidos en la Unión Europea deben cumplir los requisitos de “Europa Whole Vehicle Type Approval”. La homologación europea es el proceso donde un automóvil se demuestra que cumplen todos los requisitos de la legislación europea en materia de seguridad, emisiones, ruido, etc. Las pruebas de impacto frontal y lateral utilizado por Euro NCAP se basan en la legislación europea. Sin embargo, los requisitos de rendimiento utilizados en Euro NCAP son mucho más estrictos. Un ejemplo se encuentra en la velocidad de impacto frontal utilizado por Euro NCAP con 64 km/h, frente a los 56 km/h de legislación europea.

La legislación establece un mínimo obligatorio, mientras Euro NCAP se refiere a las mejoras prácticas actuales posibles. El proceso de la legislación de seguridad del automóvil es lenta, especialmente cuando hay que tener en cuenta el punto de vista de los Estados miembros de la Unión Europea. La legislación no proporciona ningún incentivo para mejorar, mientras que Euro NCAP proporciona un estímulo constante para mejorar la regularidad de sus procedimientos de evaluación y así la mejora de la seguridad del vehículo.

A partir del 2009, el número de estrellas del vehículo refleja la seguridad global, incluyendo la protección de los ocupantes adultos y niños, la protección de los peatones y la tecnología adicional destinadas a promover la conducción segura. Los compradores de vehículos que desean el mayor nivel de seguridad deben buscar los vehículos con un ranking de cinco estrellas.

Para los vehículos valorados en el sistema anterior, se recomienda que las tres clasificaciones (adulto, niño y protección de los peatones) se tomen en consideración. En la protección de ocupantes adultos existe un máximo de cinco estrellas y para la protección de los peatones se tiene un máximo de cuatro estrellas.



En el antiguo método de calificación, la estrella del final era dada por si no había riesgo de lesión mortal, en alguna de las regiones del cuerpo más vulnerable. En el impacto frontal, las regiones más críticas son la cabeza y el pecho, mientras que en el impacto lateral son la cabeza, el abdomen y la pelvis.

Las pruebas de Euro NCAP se realizan a los automóviles con las características de seguridad que estén instalados de serie en la gran mayoría de las ventas. En 2009, los elementos de seguridad debían estar instalados en el 85 por ciento de las ventas en Europa, y debían ser opcionales en todas las variantes de la gama de modelos, con el fin de ser instalado en el vehículo de prueba. En 2010, el requisito es del 90 por ciento de las ventas, en 2011, el 95 por ciento de las ventas. En 2012, solo se realizarán las pruebas a los automóviles con el equipamiento estándar instalado en todas las ventas europeas.

Inicialmente, los fabricantes de automóviles estaban en contra del programa Euro NCAP. Sin embargo, al recibir Euro NCAP mucha publicidad y considerarlos técnicamente fiables, se comprobó que los automóviles que recibían buenas calificaciones mejoraban sus ventas y los automóviles que recibían malas calificaciones perdieron volumen de ventas. Debido a que las pruebas están basadas en la legislación europea, y que gana credibilidad gracias a los ingenieros dedicados a la seguridad de los automóviles. Al ver las ventajas de tener una evaluación independiente que guíe el diseño de la seguridad del vehículo en la dirección correcta, los fabricantes de automóviles comenzaron a apoyar el programa.

Cada fabricante es informado de la elección del coche, variantes y opciones para la realización de la prueba. Los fabricantes deben proporcionar la información de la configuración de la prueba, recomendando los asientos para niños y hacer las observaciones generales. Pueden presenciar las pruebas y decir si están satisfechos con la forma de ejecutar la prueba. Después de la prueba, se les da los resultados del examen y pueden realizar los comentarios pertinentes sobre la existencia de anomalías en comparación con sus propios datos.



### **3.1. CALIFICACIONES EURO NCAP**

Para los automóviles probados antes de 2009, Euro NCAP ha publicado tres valoraciones: la protección de adultos, niños y la protección de los peatones. Las calificaciones para la protección de adultos y la protección de niños se logran como resultado de tres pruebas de Euro NCAP que son ensayo frontal, ensayo lateral y ensayo de polo. Euro NCAP lleva a acabo un conjunto de pruebas diferentes para los peatones para determinar y examinar la puntuación de la valoración de los peatones. Estos tipos de pruebas cubren la mayor parte de accidentes que provocan las causas dominantes de lesiones graves y mortales. Además, premia a los vehículos por tener un cinturón de seguridad inteligente, como parte de la calificación de protección de adultos [3].

A partir de 2009, Euro NCAP sólo se puntúa con un número de estrellas en general por vehículo con un máximo de cinco estrellas. Esta evaluación global de seguridad se compone de las puntuaciones en cuatro ámbitos: la protección de los adultos, la protección infantil, protección de los peatones y la seguridad de prestar asistencia. La puntuación total se calcula la ponderación de las cuatro calificaciones con respecto a los otros, mientras se asegura de que no es una zona de bajo rendimiento. Los ensayos dinámicos son idénticos a los de antes de 2009, excepto por la incorporación de una prueba para la protección de lesiones cervicales en cuello de impacto trasero. Además, Euro NCAP premia ahora no sólo el dispositivo recordatorio de la colocación de los cinturones de seguridad en los ocupantes, sino también los limitadores de velocidad y el montaje de serie de Control Electrónico de Estabilidad.

A continuación se describe los cuatro ámbitos que componen la evaluación global de la seguridad del vehículo:

- **Protección de los ocupantes adultos:** Los puntos se adjudican de la prueba frontal, lateral y de polo. Los reguladores de los asientos son una posibilidad de ampliar la evaluación para cubrir los diferentes tamaños de personas, en particular para el área de contacto de la rodilla. La puntuación se complementa



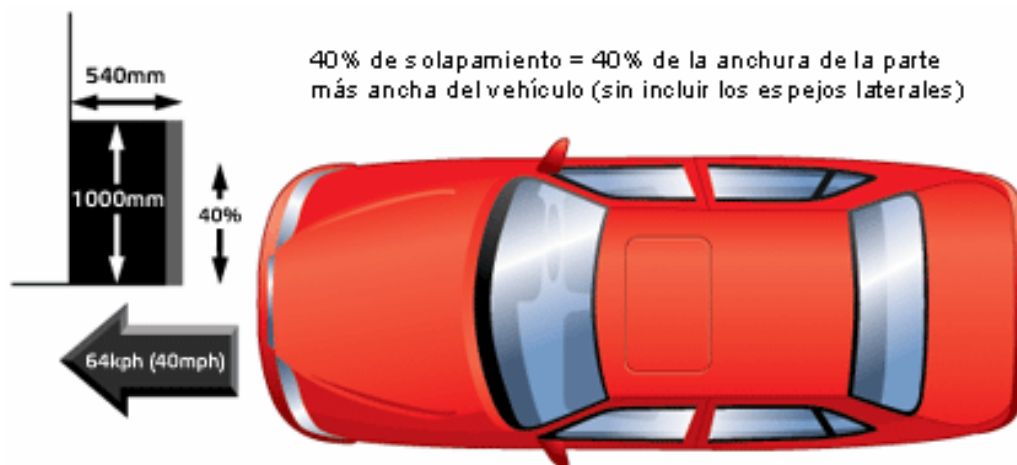
con la prueba del latigazo vertical que se lleva a cabo por separado en el conductor y en el asiento del pasajero.

- **Protección de los ocupantes infantiles:** Como parte de esta evaluación, se utiliza un dummy del tamaño de un niño de 18 meses y 3 años de edad para los ensayos de impacto frontal y lateral. Para evaluar los resultados de las pruebas de impacto, Euro NCAP verifica la claridad de las instrucciones y la instalación del asiento en el vehículo, para asegurar que el asiento para niños puede ser instalado de manera segura.
- **Protección de los peatones:** Euro NCAP considera un gran esfuerzo por parte de los fabricantes la protección de los peatones. Con la protección de los peatones se podrían salvar la vida de muchos peatones y evitar el trauma emocional que se enfrentan muchos conductores cada año. La inclusión de la puntuación de los peatones en la clasificación general, tiene como objetivo fomentar la mejora de las prestaciones del vehículo en esta evaluación. Los resultados en esta clasificación se logran evaluando la forma de la pierna, la forma superior de la pierna y la prueba de la cabeza para adulto y niño.
- **Ayuda a la seguridad:** Permite estudiar los sistemas de asistencia al conductor y las tecnologías de seguridad activa. Estas tecnologías juegan un papel cada vez más importante en la prevención de accidentes y la reducción de lesiones. Euro NCAP premia a los fabricantes que montan el control electrónico de estabilidad, además de los puntos dados por la presencia de un dispositivo de limitación de velocidad y el dispositivo recordatorio de la colocación de los cinturones de seguridad en los ocupantes.

### **3.2. IMPACTO FRONTAL**

Este impacto está destinado a representar el tipo más frecuente de accidente, produciendo lesiones graves o mortales. Simula un vehículo que tiene un impacto frontal con otro vehículo de masa similar. Como la mayoría de los choques frontales,

solo se produce en una parte del frente del vehículo. Por esta razón, solo se producirá el impacto en un 40 por ciento del ancho del vehículo. La barrera utilizada en el impacto es deformable para representar la naturaleza deformable de los vehículos. Se trata de una prueba severa, donde se observa la capacidad del vehículo para soportar el impacto sin sufrir la intrusión del habitáculo. En la figura 7 se muestra el impacto frontal que tiene lugar a 64 km/h y la barrera deformable [3].



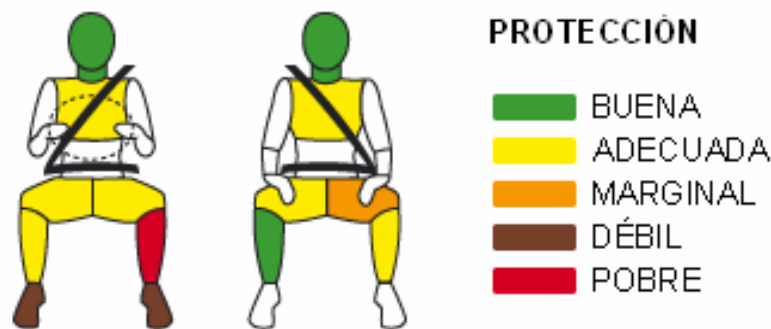
*Figura 7: Impacto frontal.*

El contacto entre los ocupantes y partes de la cabina es la causa principal de lesiones graves y mortales. La velocidad del vehículo en el impacto frontal contra la barrera deformable es de 64 km/h. Este impacto representa la colisión frontal de dos vehículos que circulan cada uno a 55 km/h. La diferencia en la velocidad se debe a la energía absorbida por la barrera deformable. Las investigaciones han demostrado que esta velocidad de impacto abarca una proporción significativa de los accidentes graves y mortales. Durante el impacto se tiene que evitar la intrusión de un objeto en la cabina del vehículo. Al impedir la intrusión en la cabina, las posibilidades de lesiones para el ocupante en el interior del vehículo se minimizan.

Euro NCAP ha fomentado la instalación de cinturones de seguridad, limitadores de carga y los airbag de doble fase, para ayudar a atenuar las fuerzas transmitidas a la cabeza de los ocupantes. También ha ayudado a evitar situaciones en las que el pecho colisiona directamente con el volante. En la mayoría de los vehículos, el sistema de

retención no puede impedir que las piernas de los ocupantes delanteros no impacten contra el salpicadero. Euro NCAP ha eliminado las estructuras de las zonas peligrosas que pueden afectar a las rodillas. El impacto en las rodillas puede causar lesiones en la rodilla y transmitirse hasta la articulación de la cadera y la pelvis. Debido a las lesiones que se producen en las piernas, se ha realizado un mayor control de la intrusión en la cabina y un mayor control de los desplazamientos de los pedales.

En la figura 8 se muestra la lectura tomada en los maniquíes para evaluar la protección otorgada a los ocupantes adultos delanteros.



*Figura 8: Evaluación ocupantes delanteros.*

Los parámetros de la prueba de impacto frontal son los siguientes:

- Se utiliza una tarjeta de adquisición de datos, que es accionada con una placa de contacto en el primer contacto ( $t=0$ ) y registra la información digital a una velocidad de muestreo de 20kHz. El equipo se ajusta a SAE J211.
- La barrera deformable se fija a los bloques de hormigón. La altura de esta barrera debe ser de  $200 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$  desde el suelo.
- Se mide la velocidad del vehículo lo más próximo al punto de impacto. Esta velocidad debe ser de  $64 \text{ km/h} \pm 1 \text{ km/h}$ .



- Se coloca una cinta pequeña lo más cerca del borde de la barrera deformable que impactara en el vehículo. Se marca el punto en el parachoques del vehículo, donde la cinta debe golpear para conseguir el 40%. Después de la prueba, si la marca hecha por la cinta no esta dentro del rectángulo de tolerancia que se describe a continuación, el análisis de la película se utiliza para tratar de evaluar el solapamiento y decidir si la prueba es valida. Solapamiento de  $40\% \pm 20$  mm y alineación vertical de  $\pm 25$  mm.
- La apertura de las puertas posterior a la prueba se registra en video. Se comprueba que ninguna de las puertas se han cerrado durante la prueba. Se trata de abrir las puertas después de la prueba aplicando una fuerza perpendicular a la puerta, salvo que ello no sea posible. El fabricante puede especificar una variación razonable del ángulo de la fuerza aplicada. Se aumenta gradualmente la fuerza hasta un máximo de 500 N, hasta conseguir abrir la puerta. Si la puerta no se abre, se registra que fuerza es necesaria para abrirla y con un ángulo de  $45^\circ$  o si se necesitan herramientas.
- La posición del dummy después del impacto se registra en video. Para la evacuación del dummy no se mueve el dummy ni los asientos. Si el dummy no se puede evacuar con los asientos en su posición original, se reclina el asiento hacia atrás. Si aun no se pueden evacuar, se deslizan los asientos. Se registra el método utilizado para la evaluación del dummy.

En la tabla 1 se muestra los canales que se miden en el impacto frontal y el mínimo de amplitud de cada traductor.



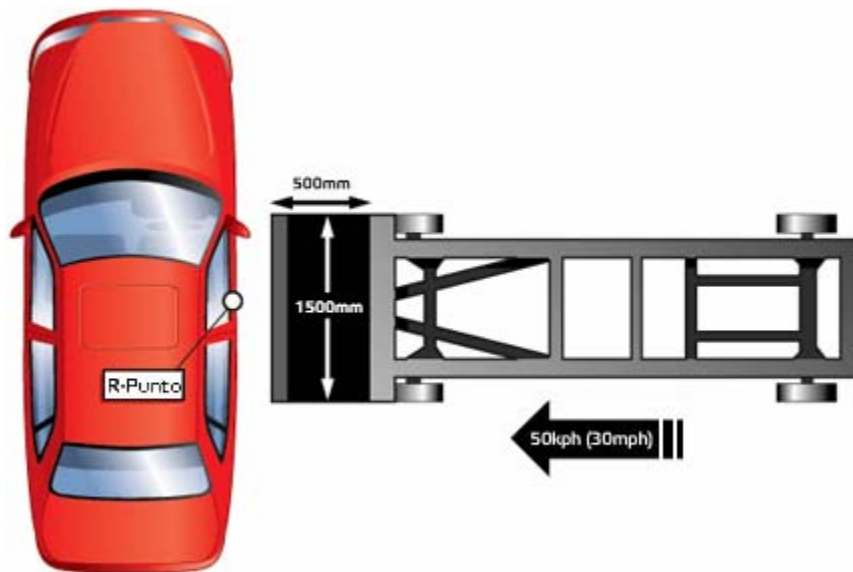


| Ubicación  | Parámetro                        | Mínimo Amplitud |
|------------|----------------------------------|-----------------|
| Cabeza     | Aceleraciones, $a_x$ $a_y$ $a_z$ | 250 g           |
| Cuello     | Fuerzas, $F_x$ $F_y$ $F_z$       | 14 kN           |
|            | Momentos, $M_x$ $M_y$ $M_z$      | 290 Nm          |
| Pecho      | Aceleraciones, $a_x$ $a_y$ $a_z$ | 150 g           |
|            | Desviación, D                    | 100 mm          |
| Fémures    | Fuerzas, $F_z$                   | 25 kN           |
| Rodillas   | Desplazamientos, D               | 19 mm           |
| Alto tibia | Fuerzas, $F_x$ $F_z$             | 12 kN           |
|            | Momentos, $M_x$ $M_y$            | 400 Nm          |
| Bajo tibia | Fuerzas, $F_x$ $F_z$             | 12 kN           |
|            | Momentos, $M_x$ $M_y$            | 400 Nm          |

Tabla 1: Canales a medir en el impacto frontal.

### 3.3. IMPACTO LATERAL

El impacto lateral es la segunda configuración más importante. Euro NCAP simula este tipo de accidente mediante una barrera deformable móvil que impacta en la puerta del conductor a 50 km/h. La protección de la lesión es evaluada por el dummy y el asiento del conductor. Aunque es difícil la protección lateral, se han producido mejoras considerables. Los airbags laterales han ayudado a incrementar el rendimiento de la seguridad lateral. En la figura 9 se muestra el impacto lateral que tiene lugar a 50 km/h y la barrera deformable [3].



*Figura 9: Impacto lateral.*

Los parámetros de la prueba de impacto lateral son los siguientes:

- Se utiliza una tarjeta de adquisición de datos, que es accionada por una placa de contacto en el primer contacto ( $t = 0$ ) y registra la información digital a una velocidad de muestreo de 20kHz. El equipo se ajusta a SAE J211.
- Se mide la velocidad del vehículo lo más próximo al punto de impacto. Esta velocidad debe ser de 50 km/h  $\pm$  1 km/h.
- Se utiliza el frenado Post-impacto. Se debe emplear para eliminar los efectos secundarios entre la barrera y el vehículo. Este puede ser un sistema de frenado de emergencia en el carro u otro método, pero debe ser activado solamente después de completarse el primer impacto.
- Se coloca una cinta pequeña en el eje de la barrera deformable lo más cercano al primer punto de contacto. La cinta debe alinearse con la línea vertical de punto R. Previamente se marca el punto R del vehículo, donde la cinta debe golpear. Después de la prueba, si la marca hecha por la cinta no está dentro de la tolerancia que se describe a continuación, el análisis de la película se utiliza para tratar de evaluar la alineación y decidir si la prueba es



válida. La alineación de la barrera debe coincidir con la línea del punto R del vehículo con una tolerancia de  $\pm 25$  mm y la alineación vertical de  $\pm 25$  mm.

- La apertura de las puertas posterior a la prueba se registra en video. Se comprueba que ninguna de las puertas se han cerrado durante la prueba. Se trata de abrir las puertas después de la prueba aplicando una fuerza perpendicular a la puerta, salvo que ello no sea posible. El fabricante puede especificar una variación razonable del ángulo de la fuerza aplicada. Se aumenta gradualmente la fuerza hasta un máximo de 500 N, hasta conseguir abrir la puerta. Si la puerta no se abre, se registra que fuerza es necesaria para abrirla y con un ángulo de  $45^\circ$  o si se necesitan herramientas.
- La posición del dummy después del impacto se registra en video. Para la evacuación del dummy no se mueve el dummy ni los asientos. Si el dummy no se pueden evacuar con los asientos en su posición original, se reclina el asiento hacia atrás. Si aun no se pueden evacuar, se deslizan los asientos. Se registra el método utilizado para la evaluación del dummy.

En la tabla 2 se muestra los canales que se miden en el impacto lateral y el mínimo de amplitud de cada traductor.

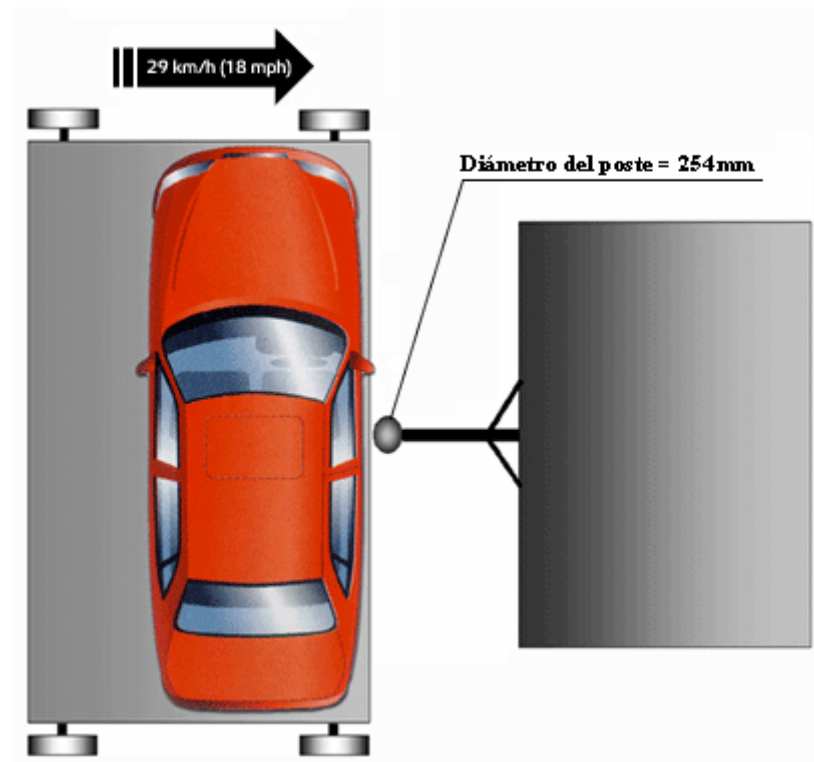


| Ubicación | Parámetro                        | Mínimo Amplitud |
|-----------|----------------------------------|-----------------|
| Cabeza    | Aceleraciones, $a_x$ $a_y$ $a_z$ | 250 g           |
| Hombro    | Fuerzas, $F_x$ $F_y$ $F_z$       | 8 kN            |
| Tórax T1  | Aceleraciones, $a_x$ $a_y$ $a_z$ | 200 g           |
| Tórax T12 | Aceleraciones, $a_y$             | 200 g           |
| Costillas | Desviación, D                    | 90 mm           |
|           | Aceleraciones, $a_y$             | 700 g           |
| Abdomen   | Fuerzas, $F_y$                   | 5 kN            |
| Espalda   | Fuerzas, $F_x$ $F_y$             | 5 kN            |
|           | Momentos, $M_y$ $M_z$            | 200 Nm          |
| T12       | Fuerzas, $F_x$ $F_y$             | 5 kN            |
|           | Momentos, $M_x$ $M_y$            | 300 Nm          |
| Pelvis    | Aceleraciones, $a_x$ $a_y$ $a_z$ | 150 g           |
| Pubis     | Fuerzas, $F_y$                   | 20 kN           |
| Fémures   | Fuerzas, $F_x$ $F_y$ $F_z$       | 20 kN           |
|           | Momentos, $M_x$ $M_y$ $M_z$      | 20 kN           |

Tabla 2: Canales a medir en el impacto lateral.

### 3.4. IMPACTO LATERAL CONTRA POSTE

Un cuarto de las lesiones se producen en impactos laterales, muchas de estas lesiones ocurren cuando el vehículo impacta contra un objeto fijo como puede ser un árbol o un poste. En la prueba de impacto lateral contra poste el vehículo es propulsado lateralmente a una velocidad de 29 km/h para que impacte contra un poste rígido. Este poste es relativamente estrecho, por lo que la penetración es mayor en el lado del vehículo. En la figura 10 se muestra el impacto lateral contra un poste que tiene lugar a 29 km/h y el poste rígido [3].



*Figura 10: Impacto lateral contra poste.*

En este tipo de impacto, sin la protección de airbag laterales, la cabeza del conductor podría alcanzar el poste con la suficiente fuerza para causarle una lesión mortal en la cabeza. Un airbag lateral hace que este tipo de accidente, a pesar de la gravedad, evite una lesión mortal. A partir de 2009, la prueba de poste se ha convertido en obligatoria, y ahora incluye evaluaciones en otras regiones del cuerpo que podrían verse afectadas, tales como el pecho y el abdomen.

Los parámetros de la prueba de impacto lateral contra poste son los siguientes:

- Se utiliza una tarjeta de adquisición de datos, que es accionada por una placa de contacto en el primer contacto ( $t = 0$ ) y registra la información digital a una velocidad de muestreo de 20kHz. El equipo se ajusta a SAE J211.
- Para evitar el movimiento del vehículo antes del impacto, el vehículo puede ser fijado a la plataforma hasta 5 metros antes del impacto. La velocidad



debe ser alcanzada 10 metro antes del impacto. Se desacelera la plataforma 100 ms después del impacto. Se coloca el vehículo en la plataforma para lograr alinear la línea del impacto con la línea central del poste. La precisión del impacto horizontal debe ser de  $\pm 38$  mm. Para evitar la fricción se colocan hojas de PTFE entre los neumáticos y la plataforma.

- El poste es una estructura metálica vertical, empieza a 102 mm del punto más bajo de los neumáticos y termina a 100 mm por encima del punto más alto del vehículo. El poste es de  $254 \pm 3$  mm de diámetro. Se marca una línea a lo largo del eje vertical del poste para poder utilizarla para verificar la alineación del impacto.
- Durante la aceleración, esta no puede exceder de  $1,5 \text{ m/s}^2$ . Se mide la velocidad del vehículo lo más próximo al punto de impacto. Esta velocidad debe ser de  $29 \text{ km/h} \pm 0,5 \text{ km/h}$ .
- El ángulo de impacto debe ser de  $90^\circ \pm 3^\circ$ .
- La apertura de las puertas posterior a la prueba se registra en video. Se comprueba que ninguna de las puertas se han cerrado durante la prueba. Se trata de abrir las puertas después de la prueba aplicando una fuerza perpendicular a la puerta, salvo que ello no sea posible. El fabricante puede especificar una variación razonable del ángulo de la fuerza aplicada. Se aumenta gradualmente la fuerza hasta un máximo de 500 N, hasta conseguir abrir la puerta. Si la puerta no se abre, se registra que fuerza es necesaria para abrirla y con un ángulo de  $45^\circ$  o si se necesitan herramientas.
- La posición del dummy después del impacto se registra en video. Para la evacuación del dummy no se mueve el dummy ni los asientos. Si el dummy no se pueden evacuar con los asientos en su posición original, se reclina el asiento hacia atrás. Si aun no se pueden evacuar, se deslizan los asientos. Se registra el método utilizado para la evaluación del dummy.



En la tabla 3 se muestra los canales que se miden en el impacto lateral contra poste y el mínimo de amplitud de cada traductor.

| Ubicación | Parámetro                        | Mínimo Amplitud |
|-----------|----------------------------------|-----------------|
| Cabeza    | Aceleraciones, $a_x$ $a_y$ $a_z$ | 250 g           |
| Hombro    | Fuerzas, $F_x$ $F_y$ $F_z$       | 8 kN            |
| Tórax T1  | Aceleraciones, $a_x$ $a_y$ $a_z$ | 200 g           |
| Tórax T12 | Aceleraciones, $A_y$             | 200 g           |
| Costillas | Desviación, D                    | 90 mm           |
|           | Aceleraciones, $a_y$             | 700 g           |
| Abdomen   | Fuerzas, $F_y$                   | 5 kN            |
| Espalda   | Fuerzas, $F_x$ $F_y$             | 5 kN            |
|           | Momentos, $M_y$ $M_z$            | 200 Nm          |
| T12       | Fuerzas, $F_x$ $F_y$             | 5 kN            |
|           | Momentos, $M_z$ $M_y$            | 300 Nm          |
| Pelvis    | Aceleraciones, $a_x$ $a_y$ $a_z$ | 150 g           |
| Pubis     | Fuerzas, $F_y$                   | 20 kN           |
| Fémures   | Fuerzas, $F_x$ $F_y$ $F_z$       | 22 kN           |
|           | Momentos, $M_x$ $M_y$ $M_z$      | 350 Nm          |

Tabla 3: Canales a medir en el impacto lateral contra poste.



## **4. EL MÉTODO DE**

# **ELEMENTOS FINITOS**

El método de elementos finitos (MEF) ha ido adquiriendo un papel mayor en la ingeniería, ya que permite solucionar problemas que mediante los métodos matemáticos tradicionales eran prácticamente imposibles. El MEF permite realizar un modelo matemático, que es fácil de modificar y, por lo tanto, se pueden realizar mejoras en el modelo continuamente. Sin embargo, es un método de aproximación mediante unas hipótesis del método. Por esta razón, es necesario en algunas ocasiones la realización de prototipos y maquetas para acercarse al diseño óptimo deseado [6].

En la actualidad el MEF se encuentra en expansión, es utilizado en la industria y aparecen continuamente trabajos de investigación en este campo. Los ordenadores son la base para resolver las ecuaciones que se plantean en el MEF, cuyo desarrollo ha sido determinado por las innovaciones en el campo de los ordenadores. Estas innovaciones han contribuido a mejorar su uso mediante las unidades gráficas que proporcionan el diseño y la síntesis de los resultados.





## **4.1. PRINCIPIOS BÁSICOS Y APLICACIONES**

El MEF permite simular casi todos los procesos técnicos mediante una simulación por ordenador. Para poder realizar la simulación debe descomponerse el cuerpo (gaseoso, líquido o sólido) en pequeños elementos de forma más sencilla y en cuyos vértices, llamados nodos, están unidos entre sí de forma fija. Estos elementos pueden ser líneas, triángulos, cuadrados, tetraedros, pentaedros o hexaedros, pero es importante que su tamaño sea pequeño. Debido al comportamiento de los elementos formulado de forma aproximada por medio de ecuaciones lineales, dicho movimiento se restringe a una trayectoria recta, sólo es válido para elementos infinitamente pequeños, aunque el tiempo de cálculo requiere elementos mayores, de tamaño infinito. La aproximación es más real cuanto más pequeño sean los elementos. Todos los procesos no lineales, como el movimiento en una trayectoria cualquiera o un comportamiento no lineal del material, debe resolverse gradualmente de forma lineal [6].

El MEF se inició a aplicar en 1960 en la industria aeronáutica y aeroespacial, y más tarde se introdujo en la industria automovilística. El método se basa en este caso en los trabajos de la empresa Daimler Chrysler AG de Stuttgart, donde se introdujo el MEF mediante el programa ESEM, desarrollado por la propia empresa, mucho antes de que se implantara el diseño asistido por ordenador a comienzos de la década de los ochenta. Desde entonces el método ha encontrado aplicación en todos los campos técnicos, como las previsiones meteorológicas y las técnicas médicas. En la industria automovilística se utiliza desde la construcción de pequeños componentes del motor y del tren de rodaje, hasta el cálculo y diseño de la carrocería incluyendo el comportamiento ante las colisiones.

El sistema del programa MEF se genera en el Pre-procesador, habitualmente sobre la base de una geometría CAD y gran parte de modo automático. El programa de MEF calcula el modelo formulado y representa gráficamente el resultado en el Post-procesador. Un programa MEF tiene un Pre-procesador, un Post-procesador y el propio programa del método de elementos finitos. En la figura 11 se muestra el sistema de programación del método de elementos finitos.

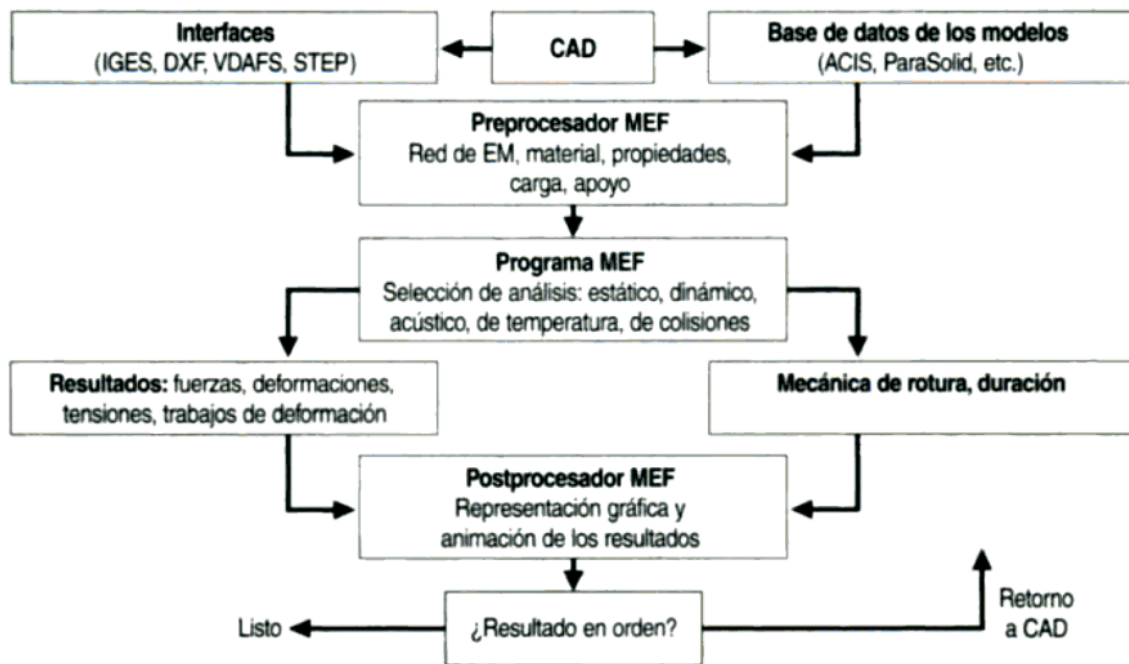


Figura 11: Sistema de programación del MEF.

En los campos de aplicación del MEF se suelen considerar 5 dominios técnicos de la física: mecánica, oscilación, termodinámicos, electricidad y óptica. En el programa de MEF se distinguen los problemas estáticos y dinámicos lineales y no lineales y los problemas de potencial estacionarios o no estacionarios. A continuación se describen dichos problemas:

- En los problemas de potencial se diferencian los estacionarios y los no estacionarios. Los problemas estacionarios se caracterizan en que se encuentra en equilibrio y el tiempo no tiene ninguna influencia. Mientras en los problemas no estacionarios todo depende del tiempo. Los problemas más frecuentes son: distribución de temperaturas a partir del flujo de calor, flujo laminar de líquidos y gases, distribución de presión, campo magnético y campo eléctrico.
- Los problemas dinámicos se rigen bajo la disciplina del movimiento ondulatorio. En los problemas lineales se determinan los valores y vectores característicos de la estructura con su correspondiente matriz de masa a partir de las fuerzas del



peso y de posibles masas añadidas. Para los problemas no lineales como amortiguación en función del tiempo, material no lineal o problemas de toques se suele requerir el uso de un programa específico.

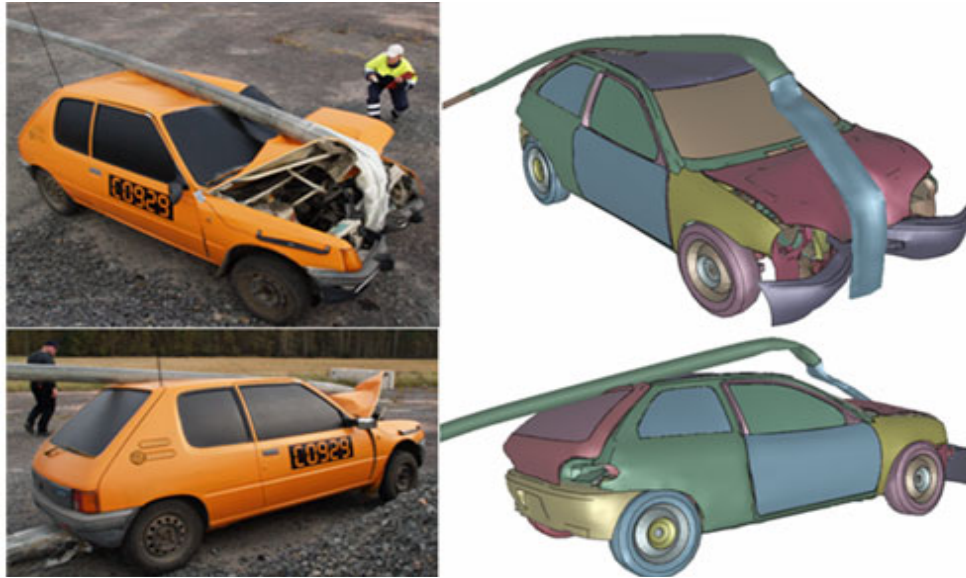
- Los problemas estáticos lineales son los problemas en los cuales se producen los esfuerzos de los componentes que se quieren calcular en el dominio elástico y en el que las desviaciones locales son relativamente pequeñas, asociadas a pequeños giros de los nodos. Los problemas estáticos no lineales se pueden tomar en consideración tanto el material no es lineal como la falta de linealidad en la geometría.

## **4.2. LS-DYNA**

El origen de LS-Dyna tiene lugar a mediados de los años setenta, con el software DYNA3D que fue desarrollado en el LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory). La primera versión de DYNA3D fue estrenada en 1976. Para compilar se empleaban máquinas como el CDC-7600, un súper ordenador cuya velocidad de procesamiento variaba desde 36 minutos cada millón de ciclos con elementos sólidos de 4 a 8 nodos a 180 minutos por cada millón de ciclos con elementos de 16 a 20 nodos. Juan O. Hallquist fue uno de los principales investigadores en el desarrollo de LS-Dyna [7].

LS-DYNA es un programa de simulación de propósito general capaz de simular problemas complejos del mundo real. Permite analizar grandes deformaciones de problemas estáticos o dinámicos de estructuras incluyendo su interacción con fluidos. Se usa ampliamente en la industria de automoción, para el diseño y desarrollo de proyectos que impliquen la mejora y seguridad de sus ocupantes, así como en el estudio de deformación de metales. También se utiliza en la industria aeroespacial para simular fallos estructurales y el estudio de materiales.

En la figura 12 se muestra los efectos tras el impacto real de un vehículo contra una farola y los resultados de la simulación del LS-DYNA del impacto del vehículo contra una farola.



*Figura 12: Impacto real y simulación del impacto.*

LS-DYNA es un producto desarrollado por la empresa Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA se proporciona con LS-PrePost y LS-OPT. LS-PrePost es una herramienta interactiva avanzada que prepara los datos de entrada a LS-DYNA y procesa los datos resultantes de los análisis del programa, utiliza gráficas estándar OpenGL para mostrar gráficas XY y renderizados rápidos. LS-OPT es el interfaz directo con LS-DYNA, proporciona el entorno adecuado para las especificaciones de entradas óptimas, monitorización y control de simulaciones paralelas y el post-proceso de los datos de simulación así como la visualización de múltiples diseños utilizando LS-PrePost.

Las características más generales del LS-DYNA se indican a continuación [8]:

- El método está basado en integración explícita.
- Un algoritmo de impacto y contacto permite tratar problemas complejos de la realidad, incluyendo transferencia de calor a través de las superficies en contacto.
- La especialización del algoritmo de contacto hace que no sea necesario mallar las zonas de transición para obtener resultados fiables.
- Ofrece una gran variedad de formulaciones para cada elemento.



- Gran especialización en la industria del automóvil. Airbag, cinturones de seguridad y sensores son un ejemplo de ello.
- Para elementos bidimensionales es capaz de refinar la malla durante el proceso en función de los resultados para obtener así mayor precisión en las zonas que la requieran.
- Aproximadamente 100 modelos y 10 ecuaciones de estado que abarcan un amplísimo rango de comportamientos de material.

En la actualidad LS-DYNA ha tenido un gran progreso y ha demostrado que puede simular problemas dinámicos muy detallados y con resultados muy semejantes a la realidad, teniendo una gran especialización en los accidentes de automóviles.



## **5. MODELOS**

# **EMPLEADOS EN LA**

# **SIMULACIÓN**

En el proyecto se simulan impactos frontales y laterales de dos vehículos tipo turismo y todo-terreno contra dos tipos de señales de tráfico de diferentes tamaños y sujeción con el suelo. Se realiza en los dos vehículos dos simulaciones con cada señal, en la primera simulación el impacto es frontal y en la segunda el impacto es lateral. Los modelos que se utilizan en el proyecto han sido desarrollados por Nacional Crash Analysis Center. NCAC ha asumido altos costes en el desarrollo de los modelos. Las simulaciones ayudan a realizar carreteras más seguras y más eficientes para todos los usuarios [9].

El sistema de coordenadas que se define en las simulaciones es el mismo en todos los casos. El eje X define la dirección y el sentido de la marcha del vehículo en el impacto frontal, el eje Y define el sentido de la marcha del vehículo en el impacto lateral. Y por ultimo, el eje Z define la vertical con sentido positivo hacia arriba. En la figura 13 se muestra las coordenadas que han sido definidas en las simulaciones, en este caso se representa uno de los vehículos del proyecto.

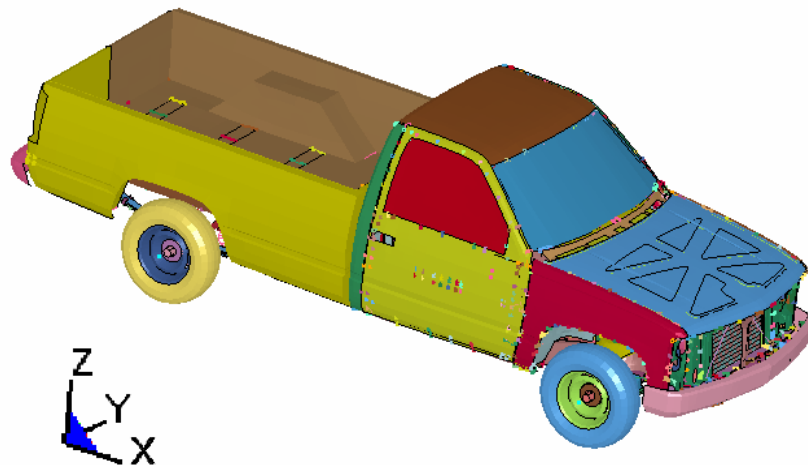


Figura 13: Coordenadas de la simulación.

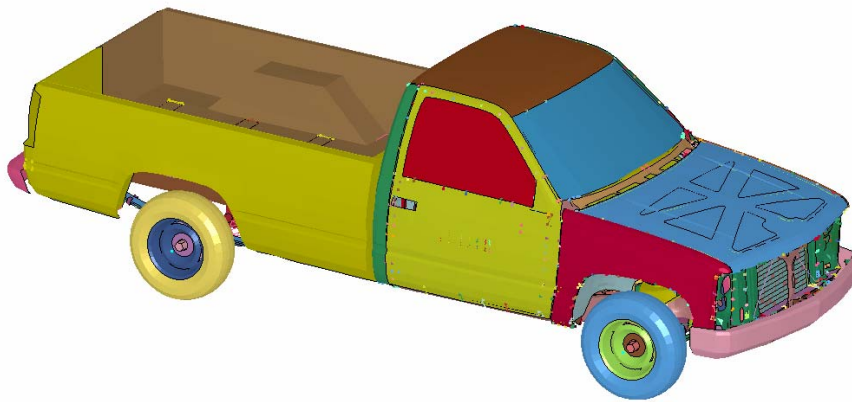
En el LS-Dyna como en el LS-PrePost no entienden de unidades, sólo de valores. De esta forma, las unidades que intervienen en la simulación deben ser coherentes entre sí, por lo tanto, el usuario tiene que establecer que unidades se van a introducir en el programa para cada magnitud. Así, el usuario al obtener los resultados pueda saber que unidades tienen dichos resultados y poder analizarlos. En la tabla 4 se muestran las unidades que han sido establecidas en las simulaciones de los impactos.

| Magnitud | Unidades |
|----------|----------|
| Masa     | Kg       |
| Tiempo   | s        |
| Longitud | mm       |
| Fuerza   | N        |
| Presión  | MPa      |

Tabla 4: Unidades en los modelos de simulación.

## 5.1. VEHÍCULO A: CHEVROLET

El vehículo empleado para la simulación del impacto es un Chevrolet modelo C2500 Pickup realizado por Nacional Crash Analysis Center en Noviembre del 2008. Dicho modelo está disponible en la página web de NCAC gratuitamente para todos los usuarios. En la figura 14 se muestra el vehículo Chevrolet C2500 Pickup utilizado en la simulación [9].



*Figura 14: Chevrolet C2500 Pickup*

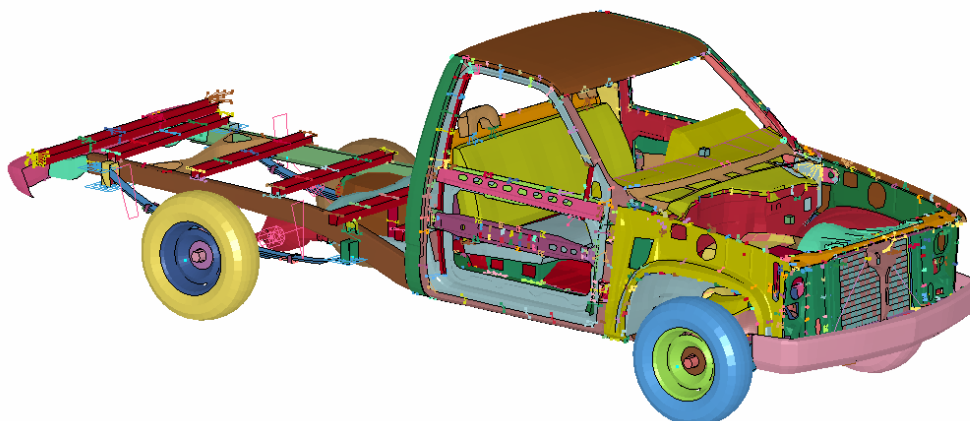
La NCAC ha realizado el Chevrolet C2500 Pickup mediante elementos finitos. Dicho modelo está formado por 251 partes, 66586 nodos y 58313 elementos. Con estos datos se puede llegar a intuir la complejidad del modelo. Aunque no es el objetivo de este proyecto entrar en detalle del modelo del vehículo, se comentan las características básicas relacionadas con la simulación. Estas características son la geometría, los materiales, la velocidad, la gravedad y los acelerómetros.

### 5.1.1. GEOMETRÍA

El vehículo está modelado básicamente en su totalidad con elementos tipo \*SHELL de diferentes espesores. Como se trata de una simulación de impacto se debe destacar la estructura del vehículo como son los largueros delanteros y traseros, los largueros superiores e inferiores, el travesaño delantero, los pilares, el techo y las barreras



laterales. El diseño de la estructura del vehículo tiene una gran importancia a la hora de un impacto, debido a que puede minimizar los daños del ocupante como se explicó en el apartado 2.1.4, mayoritariamente absorbiendo el impacto e impidiendo que invada cualquier objeto el habitáculo. En la figura 15 se muestra la estructura del vehículo Chevrolet C2500 Pickup utilizado en la simulación.



*Figura 15: Estructura del Chevrolet C2500 Pickup.*

También son importantes las características generales del vehículo a la hora de analizar el impacto. En la tabla 5 se muestran las características generales del Chevrolet C2500 Pickup.

|   | <b>Chevrolet C2500 Pickup</b> |
|---|-------------------------------|
| Neumáticos                              | P225/75 R15                   |
| Masa [kg]                               | 1741                          |
| Reparto de cargas                       | 58,2% / 41,8%                 |
| Batalla [mm]                            | 3340                          |
| Vía [mm]                                | 1956                          |
| Altura del C.G [mm]                     | 888                           |
| Distancia del C.G al eje delantero [mm] | 1557                          |
| Numero de ocupantes                     | 2                             |

*Tabla 5: Características generales del Chevrolet C2500 Pickup.*



### 5.1.2. MATERIALES

La mayoría de las partes de las piezas del vehículo empleadas en la simulación están formadas por materiales del tipo \*PCEWISE LINEAR PLASTICITY, es decir, material de comportamiento elástico-plástico, en los que la tensión es linealmente dependiente de la deformación hasta que se supere el límite elástico. Cuando se supera el límite elástico entra en plasticidad y desaparece la linealidad que había entre tensión-deformación, experimentando el material grandes deformaciones lo cual contribuye a absorber la energía del impacto [10].

En los \*PCEWISE LINEAR PLASTICITY se encuentran los componentes estructurales longitudinales, parachoques delantero, toda la carrocería del vehículo, algunas piezas del motor y las llantas. Los parámetros de este material se pueden observar desde la tabla 6 hasta la tabla 9.

|  |                             |
|--|-----------------------------|
| <b>Densidad <math>\rho</math></b>            | 1.300e-8 Kg/mm <sup>3</sup> |
| <b>Módulo de Young E</b>                     | 2.000e+5 MPa                |
| <b>Coefficiente de Poisson</b>               | 0.3                         |
| <b>Límite elástico <math>\sigma_y</math></b> | 385 MPa                     |

Tabla 6: Picewise Linear Plasticity I Chevrolet.

|  |                             |
|--|-----------------------------|
| <b>Densidad <math>\rho</math></b>            | 7.890e-9 Kg/mm <sup>3</sup> |
| <b>Módulo de Young E</b>                     | 2.000e+5 MP                 |
| <b>Coefficiente de Poisson</b>               | 0.3                         |
| <b>Límite elástico <math>\sigma_y</math></b> | 270 MPa                     |

Tabla 7: Picewise Linear Plasticity II Chevrolet.

|  |                             |
|--|-----------------------------|
| <b>Densidad <math>\rho</math></b>            | 7.890e-9 Kg/mm <sup>3</sup> |
| <b>Módulo de Young E</b>                     | 2.000e+5 MPa                |
| <b>Coefficiente de Poisson</b>               | 0.3                         |
| <b>Límite elástico <math>\sigma_y</math></b> | 350 MPa                     |

Tabla 8: Picewise Linear Plasticity III Chevrolet.



|  |                             |
|--|-----------------------------|
| <b>Densidad <math>\rho</math></b>            | 1.100e-9 Kg/mm <sup>3</sup> |
| <b>Módulo de Young E</b>                     | 3400 MPa                    |
| <b>Coefficiente de Poisson</b>               | 0.3                         |
| <b>Límite elástico <math>\sigma_y</math></b> | 100 MPa                     |

*Tabla 9: Picewise Linear Plasticity IV Chevrolet.*

También se ha usado el material de tipo \*RIGID, pero se ha empleado en un número menor piezas. El tipo \*RIGID considera a la pieza como un sólido rígido. Las piezas del vehículo que han sido definidas por este tipo de material son los frenos, los árboles de transmisión, el diferencial, algunas piezas del motor, la ballesta, la barra de dirección y los elementos estructurales transversales. Los parámetros de este material se pueden observar desde la tabla 10 hasta la tabla 12.

|                                   |                             |
|-----------------------------------|-----------------------------|
| <b>Densidad <math>\rho</math></b> | 7.890e-9 Kg/mm <sup>3</sup> |
| <b>Módulo de Young E</b>          | 2.000e+5 MPa                |
| <b>Coefficiente de Poisson</b>    | 0.3                         |

*Tabla 10: Rigid I Chevrolet.*

|                                   |                             |
|-----------------------------------|-----------------------------|
| <b>Densidad <math>\rho</math></b> | 2.350e-8 Kg/mm <sup>3</sup> |
| <b>Módulo de Young E</b>          | 2.000e+5 MPa                |
| <b>Coefficiente de Poisson</b>    | 0.3                         |

*Tabla 11: Rigid II Chevrolet.*

|                                   |                             |
|-----------------------------------|-----------------------------|
| <b>Densidad <math>\rho</math></b> | 1.730e-9 Kg/mm <sup>3</sup> |
| <b>Módulo de Young E</b>          | 2.000e+5 MPa                |
| <b>Coefficiente de Poisson</b>    | 0.3                         |

*Tabla 12: Rigid III Chevrolet.*

Además de los materiales mencionados anteriormente, se han empleado otros tipos de materiales para otras piezas del vehículo. Debido a que se emplean en muy pocas piezas, simplemente se van a nombrar: BLATZ-KO RUBBER, DUMPER VISCOUS, NULL, ELASTIC, SPRING ELASTIC, HONEYCOMB y SPRING NONLINEAR ELASTIC.



### 5.1.3. VELOCIDAD

El LS-Dyna dispone de varios comandos para introducir la velocidad inicial al vehículo. En la simulación del proyecto se ha utilizado el comando \*INITIAL VELOCITY GENERATION, en el cual se le asigna a todos los nodos del vehículo una misma velocidad lineal. Este comando no implica un tiempo muy elevado de cálculo. Es el comando más utilizado para este tipo de simulaciones [10].

La velocidad inicial que ha sido introducida en el vehículo en el impacto frontal es de 64 km/h, que es la velocidad en la cual el vehículo impacta contra las señales en la simulación. Esta velocidad de impacto se ha tomado del ensayo frontal que se realiza en Euro NCAP. Para esta velocidad se ha tenido en cuenta que el conductor del vehículo reduce la velocidad del vehículo antes de la colisión. La velocidad inicial que ha sido introducida en el vehículo en el impacto lateral es de 29 km/h. Esta velocidad de impacto también se ha tomado del ensayo lateral que se realiza en Euro NCAP [3].

Para introducir la velocidad en el LS-Dyna hay que tener en cuenta algunos parámetros específicos para realizar el comando. Los parámetros son los siguientes:

- Se determina la velocidad inicial del vehículo. En 64 km/h en el sentido de la marcha del vehículo para el impacto frontal. Según las coordenadas tomadas por el LS-Dyna la velocidad tiene el sentido del eje X. Para introducir la velocidad hay que tener en cuenta las unidades que se utilizan en la simulación. Por lo tanto, la velocidad inicial es:

$$V_x = 1,778 \cdot 10^4 \text{ mm/s}$$

Para el impacto lateral la velocidad inicial del vehículo es de 29 km/h. Según las coordenadas del LS-Dyna la velocidad tiene el sentido del eje Y. Por lo tanto, velocidad inicial es:

$$V_y = 8,055 \cdot 10^3 \text{ mm/s}$$



- El segundo parámetro que se determina es la velocidad angular de las ruedas tanto del eje trasero como del eje delantero. Para calcular la velocidad angular se necesita el radio del neumático. Al tener un neumático P225/75 R15 se obtiene que el radio es de 359,25 mm. El eje de rotación de las ruedas es el eje Y, por lo tanto, usando la siguiente ecuación se calcula la velocidad angular:

$$V_x = \omega_y \cdot R \quad \text{Ecuación 1.}$$

Donde:

$V_x$  : Velocidad inicial del vehículo en mm/s.

$R$  : Radio del neumático del vehículo en mm.

$\omega_y$  : Velocidad angular de la ruedas del vehículo en rad/s.

Despejando la velocidad angular de la ecuación 1 con  $R = 359,25\text{mm}$  y

$V_x = 1,778 \cdot 10^4 \text{ mm/s}$ , se obtiene la velocidad angular:

$$\omega_y = 49,49 \text{ rad/s}$$

- Y el tercer parámetro se determinan las coordenadas del centro de rotación de los dos ejes. En la tabla 13 se muestran las coordenadas de rotación de los dos ejes.

| Rueda         | X [mm] | Z [mm] |
|---------------|--------|--------|
| Eje delantero | 3649   | 343    |
| Eje trasero   | 270    | 355    |

Tabla 13: Coordenadas de rotación de los neumáticos.

#### 5.1.4. GRAVEDAD

El efecto de la gravedad se ha introducido en la simulación imponiendo una aceleración en dirección y sentidos  $-Z$ , es decir, en dirección vertical y sentido hacia abajo. Esta aceleración se ha impuesto a todos los nodos mediante el comando \*LOAD\_BODY\_Z. El valor de la aceleración se introduce como una constante de valor  $9,81 \cdot 10^3 \text{ mm/s}^2$  [10].



### 5.1.5. ACELERÓMETROS

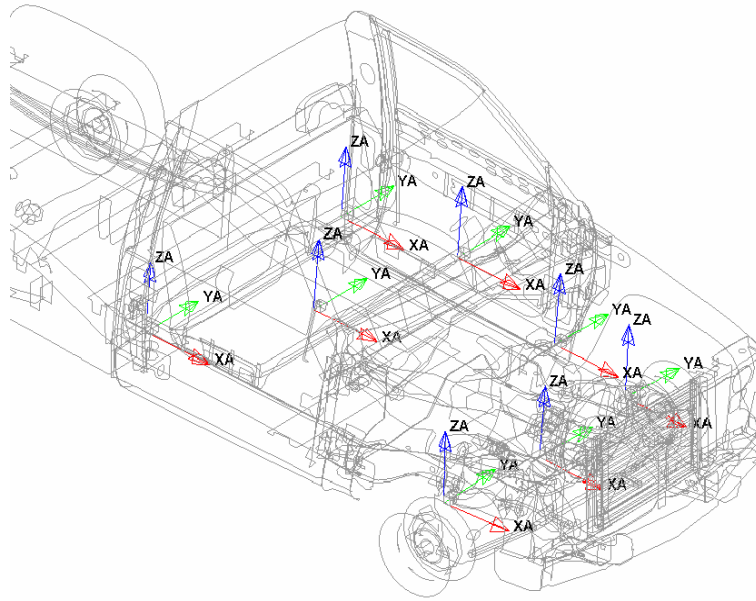
Los acelerómetros son dispositivos que permiten medir las aceleraciones en distintas zonas. Son instalados en diferentes partes de la geometría del vehículo para poder obtener la aceleración de dicha zona. Suelen instalarse en los diferentes asientos, en las ruedas o en la parte frontal del vehículo.

En el LS-PrePost el acelerómetro es una pieza en forma de cubo, que realiza la función de acelerómetro y lleva afiliada un sistema de coordenadas locales caracterizado por los ejes  $X_A$ ,  $Y_A$ ,  $Z_A$ . La información obtenida por el acelerómetro se registra y se almacena. En el post-procesado se obtiene la aceleración recogida por el acelerómetro virtual en cada uno de sus ejes como una función del tiempo [10].

El vehículo tiene instalado ocho acelerómetros, en el proyecto se utiliza el acelerómetro instalado en el centro de gravedad para calcular la severidad del impacto. En la tabla 14 se muestran la ubicación de cada uno de los acelerómetros en el vehículo. En la figura 16 se muestra la localización de los acelerómetros en el vehículo.

| Nodo    | Localización de los acelerómetros        |
|---------|--|
| 2061924 | Parte trasera del asiento del conductor. |
| 2061932 | Parte trasera del asiento del copiloto.  |
| 2061940 | Parte superior de la zona del motor.     |
| 2061948 | Parte inferior de la zona del motor.     |
| 2061964 | Eje delantero parte izquierda.           |
| 2061956 | Eje delantero parte derecha.             |
| 2061972 | Salpicadero.                             |
| 2061916 | Parte central del asiento: C.d.G.        |

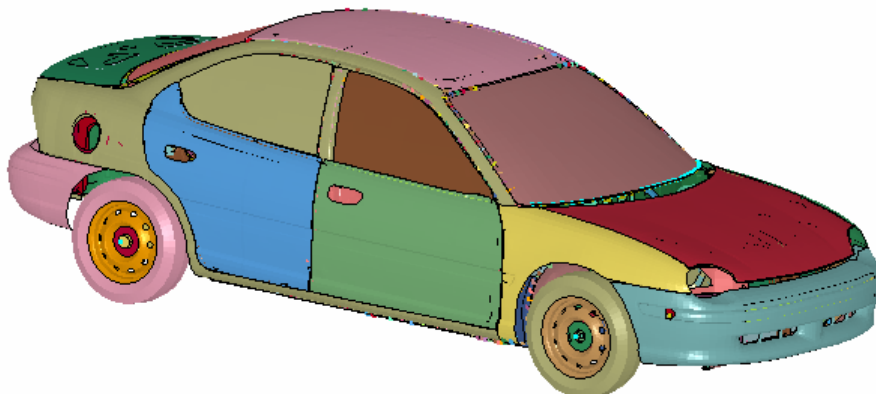
Tabla 14: Localización de los acelerómetros del Chevrolet C2500.



*Figura 16: Localización de los acelerómetros en el Chevrolet C2500.*

## **5.2. VEHÍCULO B: DODGE**

El segundo vehículo empleado para la simulación del impacto es un Dodge modelo Neon realizado por Nacional Crash Analysis Center en Julio del 2006. Dicho modelo está disponible en la página web de NCAC gratuitamente para todos los usuarios. En la figura 17 se muestra el vehículo Dodge Neon utilizado en la simulación [9].

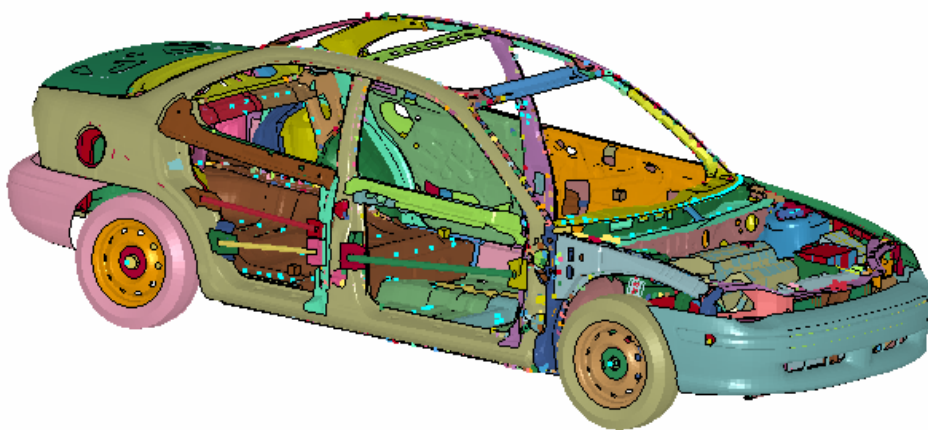


*Figura 17: Dodge Neon.*

La NCAC ha realizado el Dodge Neon mediante elementos finitos. Dicho modelo está formado por 336 partes, 283859 nodos y 270768 elementos. Con estos datos se puede llegar a intuir la complejidad del modelo. Aunque no es el objetivo de este proyecto entrar en detalle del modelo del vehículo, se comentan las características básicas relacionadas con la simulación. Estas características son la geometría, los materiales, la velocidad, la gravedad y los acelerómetros.

### 5.2.1. GEOMETRÍA

El vehículo está modelado básicamente en su totalidad con elementos tipo \*SHELL de diferentes espesores. Como se trata de una simulación de impacto se debe destacar la estructura del vehículo como son los largueros delanteros y traseros, los largueros superiores e inferiores, el travesaño delantero, los pilares, el techo y las barreras laterales. El diseño de la estructura del vehículo tiene una gran importancia a la hora de un impacto, debido a que puede minimizar los daños del ocupante como se explico en el apartado 2.1.4, mayoritariamente absorbiendo el impacto e impidiendo que invada cualquier objeto el habitáculo. En la figura 18 se muestra la estructura del vehículo Dodge Neon utilizado en la simulación.



*Figura 18: Estructura del Dodge Neon.*





También son importantes las características generales del vehículo a la hora de analizar el impacto. En la tabla 15 se muestran las características generales del Dodge Neon.

|   | Dodge Neon    |
|---|---------------|
| Neumáticos                              | P185/65 R15   |
| Masa [kg]                               | 1333          |
| Reparto de cargas                       | 64,5% / 35,5% |
| Batalla [mm]                            | 2648          |
| Altura del C.G [mm]                     | 496           |
| Distancia del C.G al eje delantero [mm] | 1046          |
| Numero de ocupantes                     | 5             |

*Tabla 15: Características generales del Dodge Neon.*

## 5.2.2. MATERIALES

La mayoría de las partes de las piezas del vehículo empleadas en la simulación están formadas por materiales del tipo `*PCEWISE LINEAR PLASTICITY`, es decir, material de comportamiento elástico-plástico, en los que la tensión es linealmente dependiente de la deformación hasta que se supere el límite elástico. Cuando se supera el límite elástico entra en plasticidad y desaparece la linealidad que había entre tensión-deformación, experimentando el material grandes deformaciones lo cual contribuye a absorber la energía del impacto [10].

En los `*PCEWISE LINEAR PLASTICITY` se encuentran los componentes estructurales longitudinales y transversales, parachoques delantero y trasero, toda la carrocería del vehículo, algunas piezas del motor y las llantas. Los parámetros de este material se pueden observar desde la tabla 16 hasta la tabla 19.



|  |                             |
|--|-----------------------------|
| <b>Densidad <math>\rho</math></b>            | 7.890e-9 Kg/mm <sup>3</sup> |
| <b>Módulo de Young E</b>                     | 2.100e+5 MPa                |
| <b>Coeficiente de Poisson</b>                | 0.3                         |
| <b>Límite elástico <math>\sigma_y</math></b> | 250 MPa                     |

*Tabla 16: Picewise Linear Plasticity I Dogde.*

|  |                             |
|--|-----------------------------|
| <b>Densidad <math>\rho</math></b>            | 7.890e-9 Kg/mm <sup>3</sup> |
| <b>Módulo de Young E</b>                     | 2.000e+5 MP                 |
| <b>Coeficiente de Poisson</b>                | 0.3                         |
| <b>Límite elástico <math>\sigma_y</math></b> | 370 MPa                     |

*Tabla 17: Picewise Linear Plasticity II Dogde.*

|  |                             |
|--|-----------------------------|
| <b>Densidad <math>\rho</math></b>            | 7.890e-9 Kg/mm <sup>3</sup> |
| <b>Módulo de Young E</b>                     | 2.100e+5 MPa                |
| <b>Coeficiente de Poisson</b>                | 0.3                         |
| <b>Límite elástico <math>\sigma_y</math></b> | 600 MPa                     |

*Tabla 18: Picewise Linear Plasticity III Dogde.*

|  |                             |
|--|-----------------------------|
| <b>Densidad <math>\rho</math></b>            | 7.890e-9 Kg/mm <sup>3</sup> |
| <b>Módulo de Young E</b>                     | 2.100e+5 MPa                |
| <b>Coeficiente de Poisson</b>                | 0.3                         |
| <b>Límite elástico <math>\sigma_y</math></b> | 400 MPa                     |

*Tabla 19: Picewise Linear Plasticity IV Dogde.*

En el vehículo se han usado además otro tipo de material de tipo \*RIGID, pero se ha empleado en un número menor piezas. El tipo \*RIGID considera a la pieza como un sólido rígido. Las piezas del vehículo que han sido definidas por este tipo de material son los frenos, los árboles de transmisión, el diferencial, algunas piezas del motor y la barra de dirección. Los parámetros de este material se pueden observar desde la tabla 20 hasta la tabla 21.



|                                   |                              |
|-----------------------------------|------------------------------|
| <b>Densidad <math>\rho</math></b> | 7.890e-10 Kg/mm <sup>3</sup> |
| <b>Módulo de Young E</b>          | 2.000e+5 MPa                 |
| <b>Coefficiente de Poisson</b>    | 0.3                          |

*Tabla 20: Rigid I Dogde.*

|                                   |                             |
|-----------------------------------|-----------------------------|
| <b>Densidad <math>\rho</math></b> | 7.890e-9 Kg/mm <sup>3</sup> |
| <b>Módulo de Young E</b>          | 2.100e+5 MPa                |
| <b>Coefficiente de Poisson</b>    | 0.3                         |

*Tabla 21: Rigid II Dogde.*

Además de los materiales mencionados anteriormente, en el vehículo también se han empleado otro tipo de materiales para otras piezas del vehículo. Debido a que se emplean en muy pocas piezas, simplemente se van a nombrar: BLATZ-KO RUBBER, DUMPER VISCOUS, NULL, SPRING ELASTIC, HONEYCOMB, SPRING NONLINEAR ELASTIC y ELASTIC.

### 5.2.3. VELOCIDAD

El LS-Dyna dispone de varios comandos para introducir la velocidad inicial al vehículo. En la simulación del proyecto se ha utilizado el comando \*INITIAL\_VELOCITY\_GENERATION, en el cual se le asigna a todos los nodos del vehículo una misma velocidad lineal. Este comando no implica un tiempo muy elevado de cálculo. Es el comando más utilizado para este tipo de simulaciones [10].

La velocidad inicial que ha sido introducida en el vehículo en el impacto frontal es de 64 km/h, que es la velocidad en la cual el vehículo impacta contra las señales en la simulación. Esta velocidad de impacto se ha tomado del ensayo frontal que se realiza en Euro NCAP. Para esta velocidad se ha tenido en cuenta que el conductor del vehículo reduce la velocidad del vehículo antes de la colisión. La velocidad inicial que ha sido introducida en el vehículo en el impacto lateral es de 29 km/h. Esta velocidad de impacto también se ha tomado del ensayo lateral que se realiza en Euro NCAP [3].



Para introducir la velocidad en el LS-Dyna hay que tener en cuenta algunos parámetros específicos para realizar el comando. Los parámetros son los siguientes:

- Se determina la velocidad inicial del vehículo en 64 km/h en el sentido de la marcha del vehículo. Según las coordenadas tomadas por el LS-Dyna la velocidad tiene el sentido del eje X. Para introducir la velocidad hay que tener en cuenta las unidades que se utilizan en la simulación. Por lo tanto, la velocidad inicial es:

$$V_x = 1,778 \cdot 10^4 \text{ mm/s}$$

Para el impacto lateral la velocidad inicial del vehículo es de 29 km/h. Según las coordenadas del LS-Dyna la velocidad tiene el sentido del eje Y. Por lo tanto, velocidad inicial es:

$$V_y = 8,055 \cdot 10^3 \text{ mm/s}$$

- El segundo parámetro que se determina es la velocidad angular de las ruedas tanto del eje trasero como del eje delantero. Para calcular la velocidad angular se necesita el radio del neumático. Al tener un neumático P185/65 R15 se obtiene que el radio es de 296 mm. El eje de rotación de las ruedas es el eje Y. Utilizando la ecuación 1 con  $R = 296 \text{ mm}$  y  $V_x = 1,778 \cdot 10^4 \text{ mm/s}$ , se obtiene la velocidad angular:

$$\omega_y = 59,3 \text{ rad/s}$$

- Y el tercer parámetro se determinan las coordenadas del centro de rotación de los dos ejes. En la tabla 22 se muestran las coordenadas de rotación de los dos ejes.

| Rueda         | X [mm] | Z [mm] |
|---------------|--------|--------|
| Eje delantero | 3683   | 296    |
| Eje trasero   | 1040   | 300    |

Tabla 22: Coordenadas de rotación de los neumáticos.



#### 5.2.4. GRAVEDAD

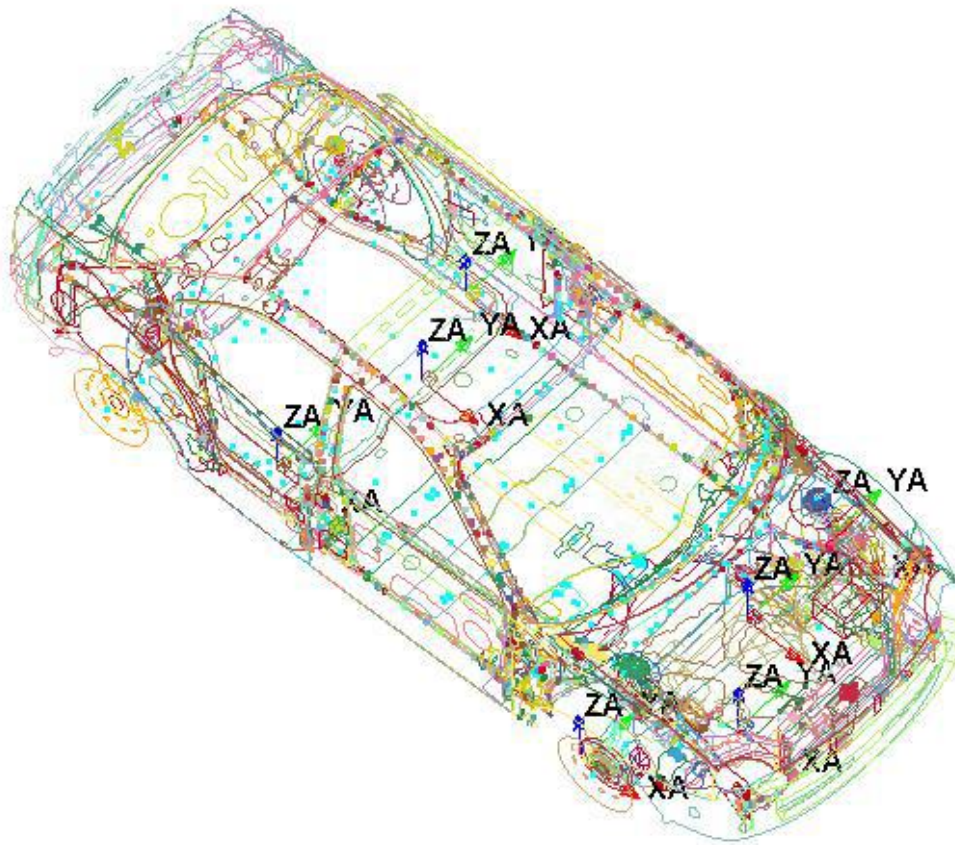
El efecto de la gravedad se ha introducido en la simulación imponiendo una aceleración en dirección y sentidos  $-Z$ , es decir, en dirección vertical y sentido hacia abajo. Esta aceleración se ha impuesto a todos los nodos mediante el comando `*LOAD_BODY_Z`. El valor de la aceleración se introduce como una constante de valor  $9,81 \cdot 10^3 \text{ mm/s}^2$  [10].

#### 5.2.5. ACELERÓMETROS

El vehículo tiene instalado siete acelerómetros, en el proyecto se utiliza el acelerómetro instalado en el centro de gravedad para calcular la severidad del impacto. En la tabla 23 se muestran la ubicación de cada uno de los acelerómetros en el vehículo. En la figura 19 se muestra la localización de los acelerómetros en el vehículo.

| Nodo    | Localización de los acelerómetros        |
|---------|--|
| 2800320 | Parte trasera del asiento del conductor. |
| 2800328 | Parte trasera del asiento del copiloto.  |
| 2800336 | Parte superior de la zona del motor.     |
| 2800344 | Parte inferior de la zona del motor.     |
| 2800360 | Eje delantero parte izquierda.           |
| 2800352 | Eje delantero parte derecha.             |
| 2800368 | Parte central del asiento: C.d.G.        |

*Tabla 23: Localización de los acelerómetros del Dodge Neon.*



*Figura 19: Localización de los acelerómetros en el Dodge Neon.*

### **5.3. SEÑAL VERTICAL PEQUEÑA**

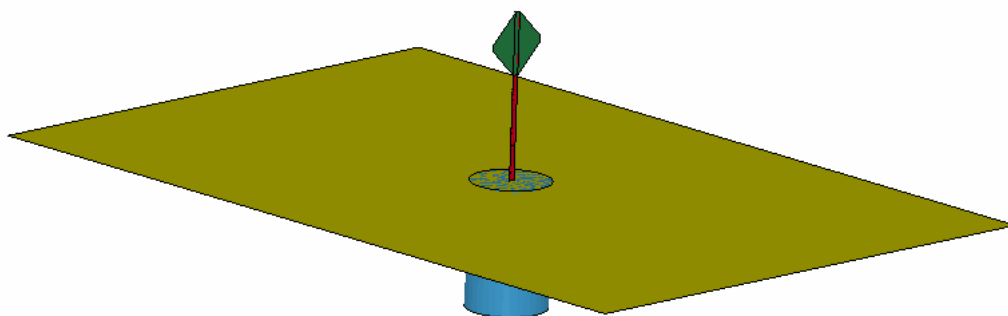
Las señales verticales pequeñas son la señalización de tráfico más abundante en todas las carreteras españolas sobre todo dentro de una población. Se trata de un poste de acero galvanizado revestida con una capa de zinc. La señal está anclada al suelo, mediante un bloque de hormigón. Además, la unión del poste de acero galvanizado con la base de hormigón actúa como reductor brusco de la velocidad del vehículo cuando impacta contra la señal de tráfico y, en el peor de los casos, arranca parte de la cimentación produciendo graves consecuencias. En la figura 20 se muestra una imagen de una población, en la cual se puede apreciar como en un recorrido corto existen varias señales verticales pequeñas [11].



*Figura 20: zona urbana de señalización.*

Como se ha podido observar en la figura 20 las señales verticales se encuentran muy próximas a la carretera, por lo tanto, al producirse una salida del vehículo de la carretera es muy posible el impacto del vehículo sobre una señal vertical. Por esta razón, es importante que el daño que se produzca tanto en el vehículo como en los ocupantes sea el mínimo posible.

La señal pequeña que se utiliza en este proyecto es un modelo realizado por la NCAC. El modelo es el 4lb./ft. U-Post realizado en Octubre del 2000. En la figura 21 se muestra el modelo 4lb./ft. U-Post [9].



*Figura 21: 4lb./ft. U-Post.*





La NCAC ha realizado el 4lb./ft. U-Post mediante elementos finitos. Dicho modelo esta formado por 4 partes, 51004 nodos y 51001 elementos. Con estos datos se puede llegar a intuir la complejidad del modelo. Este modelo está formado por una barra vertical de forma de U, el panel de la señal en forma de rombo y el suelo que lo sustenta. En los siguientes apartados se comenta con más profundidad las características básicas de la señal pequeña.

### 5.3.1. GEOMETRÍA

La señal vertical pequeña está realizada como tipo \*SHELL excepto el suelo que está realizado tipo \*SOLID. El poste tiene forma de U con un espesor de 4 mm y una longitud de 3646 mm. El poste tiene agujeros de 10 mm de diámetro con una distancia de centro a centro de 16 mm. De los 3646 mm de longitud de poste, 1213 mm están clavados en el hormigón. El panel de la señal es un rombo con una altura de 914 mm, una anchura de 914 mm y un espesor de 3 mm. La base de hormigón es un cilindro con un diámetro de 1178 mm y una altura de 1824 mm. En la figura 22 se muestra la señal vertical pequeña con las dimensiones descritas anteriormente.

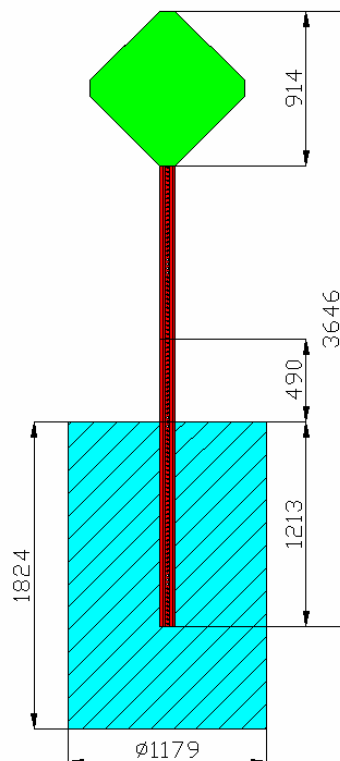


Figura 22: 4lb./ft. U-Post acotada.



A una altura de 490 mm el poste tiene una discontinuidad. La función de esta discontinuidad es dividir el poste en dos cuando se produce un impacto. En la figura 23 se muestra dicha discontinuidad y las dimensiones del perfil del poste.

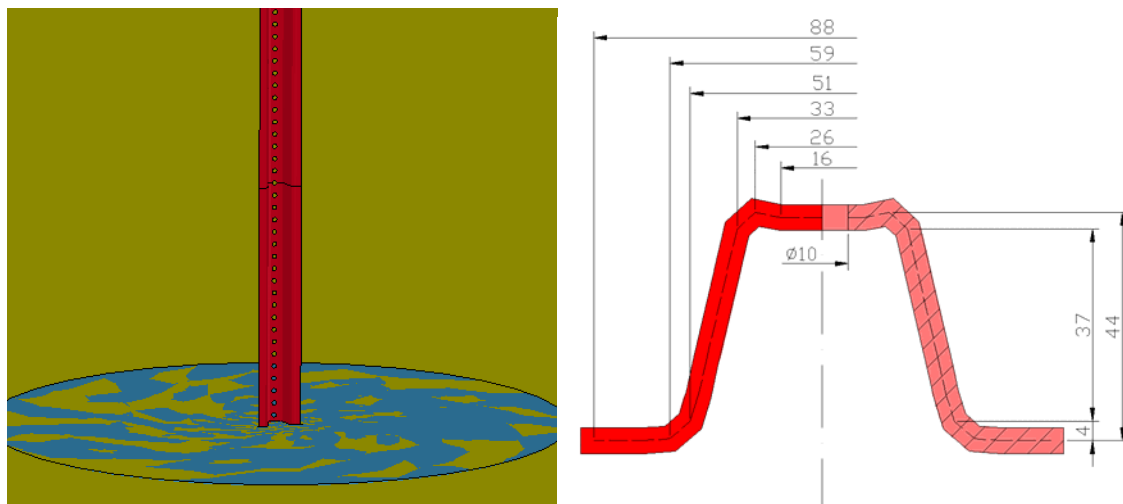


Figura 23: (1) Discontinuidad del poste. (2) Perfil acotado.

### 5.3.2. MATERIALES

El poste está realizado por material del tipo \*PIECEWISE LINEAR PLASTICITY, como se ha explicado en apartados anterior este tipo de material se comporta como un material plástico-elástico lineal. Este tipo de material puede absorber parte del impacto. Los parámetros de este material se pueden observar en la tabla 24 [10].

|  |                             |
|--|-----------------------------|
| <b>Densidad <math>\rho</math></b>            | 7.890e-9 Kg/mm <sup>3</sup> |
| <b>Módulo de Young E</b>                     | 6.600e+4 MPa                |
| <b>Coefficiente de Poisson</b>               | 0.3                         |
| <b>Límite elástico <math>\sigma_y</math></b> | 600 MPa                     |

Tabla 24: Picewise Linear Plasticity Poste, señal vertical pequeña.

El panel de la señal está realizado con el material del tipo \*ELASTIC y la base de hormigón se ha realizado con \*HONEYCOMB, este tipo de material se comporta como



plástico-elástico no lineal y se puede definir por separado todas las tensiones tangenciales y normales. El suelo se ha definido como un material de tipo \*RIGID que considera este elemento como un sólido rígido. Los parámetros del panel de la señal como del hormigón se pueden observar en la tabla 25 y 26.

|                                   |                             |
|-----------------------------------|-----------------------------|
| <b>Densidad <math>\rho</math></b> | 2.710e-9 Kg/mm <sup>3</sup> |
| <b>Módulo de Young E</b>          | 7.500e+4 MPa                |
| <b>Coefficiente de Poisson</b>    | 0.28                        |

*Tabla 25: Elastic Panel, señal vertical pequeña.*

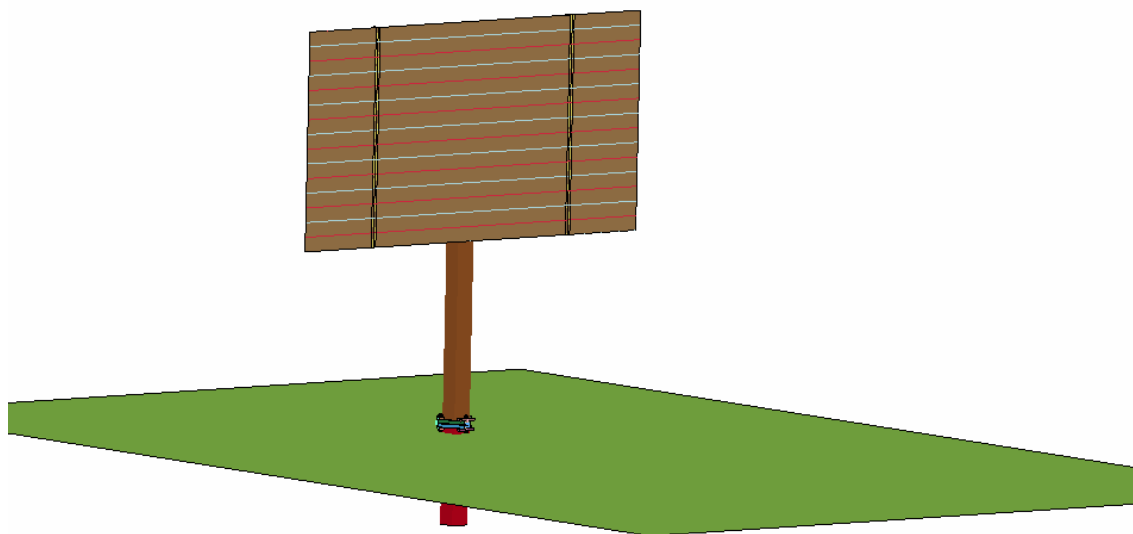
|  |                             |
|--|-----------------------------|
| <b>Densidad <math>\rho</math></b>            | 1.763e-9 Kg/mm <sup>3</sup> |
| <b>Módulo de Young E</b>                     | 2.007e+4 MPa                |
| <b>Coefficiente de Poisson</b>               | 0.3                         |
| <b>Límite elástico <math>\sigma_y</math></b> | 15 MPa                      |

*Tabla 26: Honeycomb Hormigón, señal vertical pequeña.*

## **5.4. SEÑAL VERTICAL GRANDE**

Las señales verticales grandes son abundantes en todas las carreteras españolas sobre todo en autopistas y autovías. Se trata de dos postes de acero galvanizado anclados con una junta “Slip Base” y su panel de señalización. Son un gran peligro en las carreteras debido a sus dimensiones, por esa razón suelen estar protegidas con barreras metálicas que absorben parte del impacto. El objetivo de tener una junta “Slip Base” es evitar una deceleración brusca. De esta forma se evita que el impacto entre el vehículo y el poste sea muy brusco y, por lo tanto, se minimizan los daños en el vehículo y en los ocupantes. En este proyecto las simulaciones no tienen barreras metálicas debido a que desgraciadamente no todos los postes están protegidos con barreras metálicas [12].

La señal grande que se utiliza en este proyecto es un modelo realizado por la NCAC. El modelo es el 8" × 8" Oregon Slip Base realizado en Octubre del 2000. En la figura 24 se muestra el modelo 8" × 8" Oregon Slip Base [10].



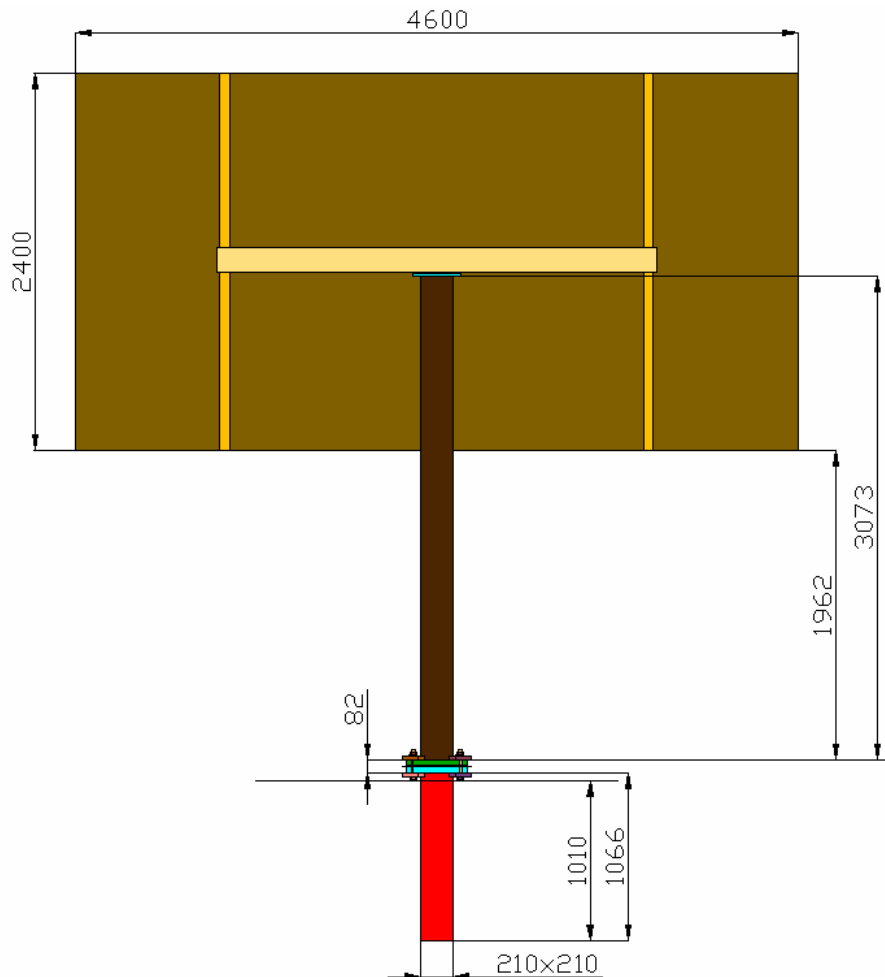
*Figura 24: 8" × 8" Oregon Slip Base.*

La NCAC ha realizado el 8" × 8" Oregon Slip Base mediante elementos finitos. Dicho modelo está formado por 29 partes, 20018 nodos y 9169 elementos. Con estos datos se puede llegar a intuir la complejidad del modelo. Este modelo está formado por dos postes vertical unidos por una junta "Slip Base", un panel de señalización con sus perfiles de sujeción y el suelo que sustenta la señal. En los siguientes apartados se comentan con más profundidad las características básicas de la señal grande.

### **5.4.1. GEOMETRÍA**

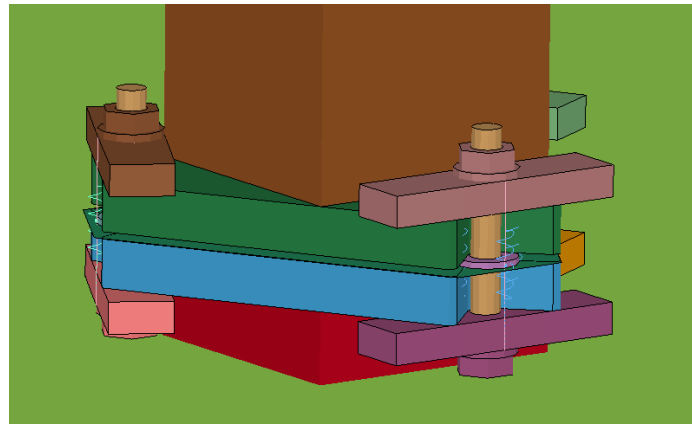
La señal vertical grande está realizada como tipo \*SHELL excepto el suelo que está realizado tipo \*SOLID. El poste tiene forma de cuadrado de 210 x 210 mm con un espesor de 4 mm. El poste está dividido en dos tramos, el superior de 3073 mm y el inferior de 1066 mm. De los 1066 mm de longitud del poste inferior, 1010 mm están anclados en el suelo. Los dos postes están unidos con un sistema de sujeción "Slip Base". El panel de la señal es un rectángulo con una altura de 2400 mm, una anchura de 4600mm y un espesor de 3 mm. El panel está fijado mediante un perfil horizontal cuadrado de 150x150 mm con una longitud de 2800 mm y dos perfiles verticales IPN

60 con una longitud de 2400 mm. En la figura 25 se muestra la señal vertical grande con las dimensiones descritas anteriormente.



*Figura 25: 8" × 8" Oregon Slip Base acotada.*

El sistema de sujeción “Slip Base” está realizado para que cuando reciba el impacto de un vehículo, éste se separe automáticamente de la cimentación mediante un proceso de rotura orientada, evitando de este modo desaceleraciones que afecten a las personas y al vehículo. En la figura 26 se muestra el sistema de sujeción “Slip Base” [12].



*Figura 26: Sistema de sujeción.*

## 5.4.2. MATERIALES

El poste superior está realizado por material del tipo \*PIECEWISE LINEAR PLASTICITY, este tipo de material se comporta como un material plástico-elástico lineal. Este tipo de material podrá absorber parte del impacto. Los espárragos y la placa de la junta también están definidos por \*PIECEWISE LINEAR PLASTICITY. Los parámetros de este material se pueden observar en la tabla 27 y 28 [10].

|  |                             |
|--|-----------------------------|
| <b>Densidad <math>\rho</math></b>            | 7.890e-9 Kg/mm <sup>3</sup> |
| <b>Módulo de Young E</b>                     | 2.000e+5 MPa                |
| <b>Coefficiente de Poisson</b>               | 0.3                         |
| <b>Límite elástico <math>\sigma_y</math></b> | 250 MPa                     |

*Tabla 27: Picewise Linear Plasticity Poste, señal vertical grande.*

|  |                             |
|--|-----------------------------|
| <b>Densidad <math>\rho</math></b>            | 7.890e-9 Kg/mm <sup>3</sup> |
| <b>Módulo de Young E</b>                     | 1.000e+5 MPa                |
| <b>Coefficiente de Poisson</b>               | 0.3                         |
| <b>Límite elástico <math>\sigma_y</math></b> | 200 MPa                     |

*Tabla 28: Picewise Linear Plasticity I señal vertical grande.*



El poste inferior, el panel de la señal y los perfiles del panel están realizados con el material del tipo \*ELASTIC. El suelo y las tapas de la junta se han definido como un material de tipo \*RIGID que considera este elemento como un sólido rígido. Los parámetros del material tipo \*ELASTIC se pueden observar en la tabla 29 y 30.

|                                   |                             |
|-----------------------------------|-----------------------------|
| <b>Densidad <math>\rho</math></b> | 7.890e-9 Kg/mm <sup>3</sup> |
| <b>Módulo de Young E</b>          | 2.000e+5 MPa                |
| <b>Coefficiente de Poisson</b>    | 0.3                         |

*Tabla 29: Elastic I señal vertical grande.*

|                                   |                             |
|-----------------------------------|-----------------------------|
| <b>Densidad <math>\rho</math></b> | 2.700e-9 Kg/mm <sup>3</sup> |
| <b>Módulo de Young E</b>          | 7.200e+4 MPa                |
| <b>Coefficiente de Poisson</b>    | 0.33                        |

*Tabla 30: Elastic II señal vertical grande.*

## **5.5. CONTACTOS**

Los contactos en la simulación forman una parte muy importante de muchos de los problemas donde aparecen grandes deformaciones. Una simulación precisa de los puntos de contacto entre los cuerpos, es crucial para una capacidad de precisión de las simulaciones de elementos finitos. LS-Dyna ofrece un gran número de tipos de contacto. Algunos de estos tipos de contactos son para aplicaciones específicas, y otros son adecuados para un uso más general. Mucho de los contactos se usan muy poco, pero se mantienen para poder permitir que modelos antiguos puedan seguir funcionando. Para conseguir una simulación que represente la realidad es muy importante la elección de un contacto y la introducción de sus parámetros [13].

En este proyecto sólo se han utilizado dos tipos de contacto para dos regiones de contacto muy diferentes. A continuación se explican los dos tipos de contactos utilizados en las simulaciones.



### **5.5.1. CONTACTO VEHÍCULO – SEÑAL**

El contacto entre el vehículo y la señal de tráfico se produce en el momento del impacto, en el cual se producen unas grandes deformaciones. Resulta muy difícil saber cómo y dónde se producirá el contacto entre los dos cuerpos. Para este caso, LS-Dyna dispone de la opción automática de contacto. Esta opción de contacto permite detectar una penetración próxima de un elemento de tipo \*SHELL [10].

En este caso no se quiere permitir la penetración en ambos elementos. Para conseguir evitar la penetración se ha simulado como un contacto entre superficies. La opción empleada es \*CONTACT AUTOMATIC SURFACE TO SURFACE. En la dirección tangencial a la superficie de contacto, los esfuerzos resultantes son producidos al rozamiento entre ambas partes quedando definidos los esfuerzos por el coeficiente de rozamiento estático y dinámico.

### **5.5.2. CONTACTO VEHÍCULO Y SENAL - SUELO**

LS-Dyna dispone de la opción \*RIGIDWALL que ofrece de una manera sencilla tratar el contacto entre una superficie rígida (el suelo) y los nodos de un cuerpo deformable (las ruedas del vehículo y el poste de la señal). Si la superficie rígida se trata de una pared plana definida como fija en el espacio se dispone de la opción de \*RIGIDWALL PLANAR. El suelo está definido como una superficie rígida y plana. Esta superficie se caracteriza con un vector normal al plano de la superficie. Una vez definida la superficie rígida, se referencia los nodos de las ruedas y nodos de los postes. En la variable \*FRIC se introduce el coeficiente de fricción. En este caso se ha considerado que el ensayo se produce en unas condiciones de firme seco, por lo tanto, el coeficiente de fricción es de 0,8 [10].



## **6. NORMA EUROPEA**

### **EN 1317**

Aunque en este proyecto se simulan impactos contra señales de tráfico, se utiliza la Norma Europea EN 1317 referida a las barreras de seguridad instaladas en las carreteras europeas. Esta norma hace referencia a: el nivel de contención ante el impacto de un vehículo, la deceleración que sufren los ocupantes y la deformación de la barrera de seguridad. La normativa establece unos parámetros que debe cumplir la barrera bajo unas circunstancias de impacto [14].

Las barreras de seguridad europeas deben aguantar el impacto de diferentes vehículos a diferentes condiciones como: velocidad, ángulo de impacto y condiciones de asfalto. Cuando se produce un impacto de un vehículo denominado como de masa media-baja (turismos), el sistema de retención debe tener la capacidad de deformarse, para absorber la mayor parte de la energía cinética que lleva el vehículo. Gracias a esta deformación se consigue reducir considerablemente las lesiones de los ocupantes de los vehículos accidentados. Cuando el impacto se produce con un vehículo denominado pesado (autobuses y camiones). La barrera de seguridad debe de conseguir aguantar y redirigir al vehículo de nuevo a la carretera sin romper ninguno de sus elementos.





La Norma Europea EN 1317 establece en su punto 2 los criterios de evaluación a partir de los cuales se clasifican las barreras de seguridad de las carreteras europeas. A continuación se explican los criterios de la norma:

- **Nivel de contención:** representa la capacidad del sistema para retener al vehículo de forma controlada. Se clasifica en cuatro niveles como: bajo, normal, alto y muy alto.
- **Severidad de impacto:** calcula las consecuencias del impacto sobre los ocupantes. Se emplean tres parámetros: índice de severidad de la aceleración (ASI), velocidad teórica de impacto de la cabeza (THIV) y deceleración de la cabeza después del impacto (PHD).
- **Deformación de la barrera de seguridad:** se mide la máxima distancia entre la cara del sistema más próxima al tráfico antes del impacto y la posición lateral más desplazada alcanzada durante el impacto. Se clasifica en ocho niveles que van desde  $W_1 = 0,6$  m hasta  $W_8 = 3,5$  m.

De los diferentes criterios de la norma, que miden la severidad de un impacto, en este proyecto sólo se va a utilizar el criterio ASI (Acceleration Severity Index). Este índice de severidad de impacto se va a utilizar para establecer una comparativa entre los dos vehículos utilizados en este proyecto. Con esta comparativa se consigue determinar que vehículo protege más a sus ocupantes ante diferentes situaciones de impactos.

El índice de severidad de la aceleración es un parámetro adimensional que se consigue de las deceleraciones producidas por el vehículo ante un impacto. Se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$ASI(t) = \left[ \left( \frac{\bar{a}_x}{\hat{a}_x} \right)^2 + \left( \frac{\bar{a}_y}{\hat{a}_y} \right)^2 + \left( \frac{\bar{a}_z}{\hat{a}_z} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación 2.}$$



Donde  $\bar{a}_x$ ,  $\bar{a}_y$  y  $\bar{a}_z$  son las aceleraciones medias experimentadas por el vehículo en un intervalo de tiempo de 50 ms desde que se produce el impacto;  $\hat{a}_x$ ,  $\hat{a}_y$  y  $\hat{a}_z$  son los valores de aceleración límite correspondientes a los tres ejes. Estos valores son 12g para la dirección longitudinal (x), 9g para la dirección transversal (y) y 10g para la dirección vertical (z).

Las lesiones que sufren los ocupantes de un vehículo ante un impacto aumentan a la vez que aumenta el índice de severidad de la aceleración. En la tabla 31 se muestra el tipo de lesiones según el índice de severidad de la aceleración.

| Tipo de lesiones     | Índice ASI |
|----------------------|------------|
| Leves                | $\leq 1$   |
| Medias - Graves      | $\leq 1,4$ |
| Muy graves - Letales | $\leq 1,9$ |

Tabla 31: Índice de severidad de la aceleración.

El índice ASI comprendido entre 0,1 y 1 ocasiona daños al vehículo pero los ocupantes solo sufren heridas leves. Cuando el índice ASI está comprendido entre 1 y 1,4 el impacto puede producir fracturas y pérdidas de conocimiento de corta duración. Las consecuencias de impacto más peligrosas e incluso letales para los ocupantes del vehículo, se producen cuando el índice ASI está comprendido entre 1,4 y un máximo de 1,9.

Cuando el índice de ASI es inferior o igual a 1,4 se puede considerar que el impacto ha sido leve. Cuando se produce esta colisión, se puede certificar el diseño de la barrera de seguridad según la norma UNE EN 1317. Cuando el índice ASI es superior a 1,4 la barrera de seguridad es rechazada.



Las aceleraciones utilizadas para el índice ASI son las aceleraciones del centro de gravedad del vehículo, considerando que el ocupante tiene colocado el cinturón de seguridad para garantizar el contacto con el vehículo durante todo el impacto. De esta forma el índice ASI es proporcional al riesgo de los ocupantes en una colisión.



## 7. RESULTADOS

Cuando se realiza una simulación de un impacto frontal como lateral se valoran las lesiones de los ocupantes mediante unos criterios de análisis. También se analizan los daños causados en el vehículo debido al impacto al que ha sido sometido. Como se indicó en el capítulo 3 uno de los criterios para analizar los daños del vehículo es comprobar si las puertas pueden abrirse [3].

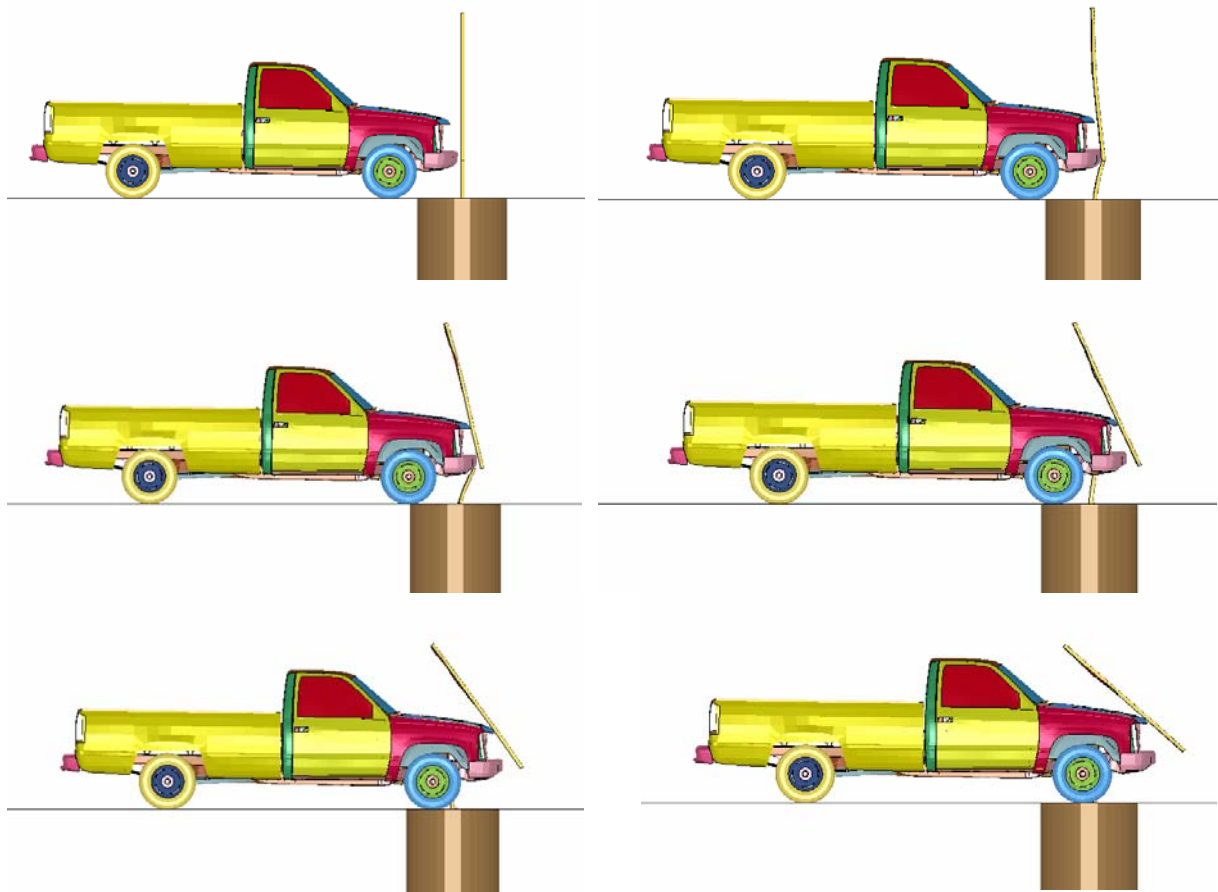
Para analizar los resultados de cada simulación se va a tomar la norma EN 1317 como criterio de evaluación. Esta norma se explica en el capítulo anterior describiendo los criterios y procedimientos de evaluación.

LS-Dyna genera archivos mientras que se realiza la compilación de la simulación. Estos archivos se establecen al principio de la simulación detallando la frecuencia. De los archivos generados se pueden obtener diversa información del impacto como velocidad, aceleraciones, deformaciones, esfuerzos, etc. Estos resultados se pueden extraer como tablas de datos o gráficas.

En los siguientes apartados se analizan los ocho casos simulados y se representan los resultados obtenidos. Por último, se comparan los resultados obtenidos para establecer una comparativa entre los dos vehículos utilizados.

## **7.1. CASO A: CHOQUE FRONTAL DEL VEHÍCULO A CONTRA LA SEÑAL PEQUEÑA**

En el primer caso, se simula un choque frontal del vehículo Chevrolet contra una señal vertical pequeña de tráfico a una velocidad de 64 km/h. El intervalo de tiempo determinado para el análisis de la simulación es de 150 ms con un registro de datos cada 2 ms. El tiempo de paso o *time step* para el paso del análisis explícito dinámico se ha determinado en 1,112  $\mu$ s y la simulación se ha realizado usando el código Ls-Dyna versión 970 [15].



*Figura 27: Secuencia del impacto frontal, Caso A.*

En la figura 27 se muestra la secuencia del impacto de la simulación con una diferencia entre imagen e imagen de 10 ms. La primera imagen se trata del instante de 40 ms antes de producirse el impacto y la segunda imagen se trata del instante de 50 ms cuando el vehículo entra en contacto con la señal. El resto de las imágenes se tratan de los instantes de tiempo 60 ms, 70 ms, 80 ms y 90 ms, cuando el vehículo golpea la señal. El orden de la imagen es de izquierda a derecha y de arriba abajo. Con esta imagen se puede apreciar el impacto producido en la simulación.

Una vez realizada la simulación, se detallan los resultados y se realiza el cálculo del índice ASI. Este índice ha sido explicado en el capítulo anterior según la norma europea EN 1317. El vehículo tiene instalados varios acelerómetros como se ha mencionado en el capítulo 5. Para el cálculo del índice ASI se usa el acelerómetro instalado en el centro de gravedad del vehículo. Los datos obtenidos del acelerómetro vienen referenciados al sistema de coordenadas del vehículo que coincide con el sistema de referencia del modelo. Las unidades que se obtienen son las definidas al principio de la simulación.

El programa LS-PrePost tiene la capacidad de obtener las gráficas del comportamiento de los acelerómetros. En la figura 28 y 29 se muestran la velocidad y la aceleración del acelerómetro C.d.G. en dirección “x”.

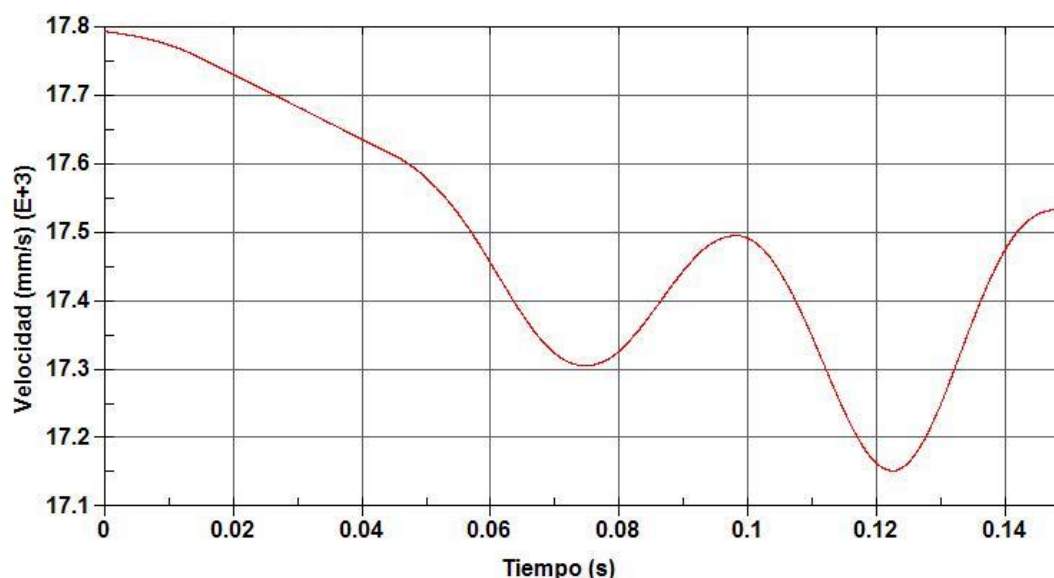


Figura 28: Gráfica de velocidad en dirección x, Caso A.

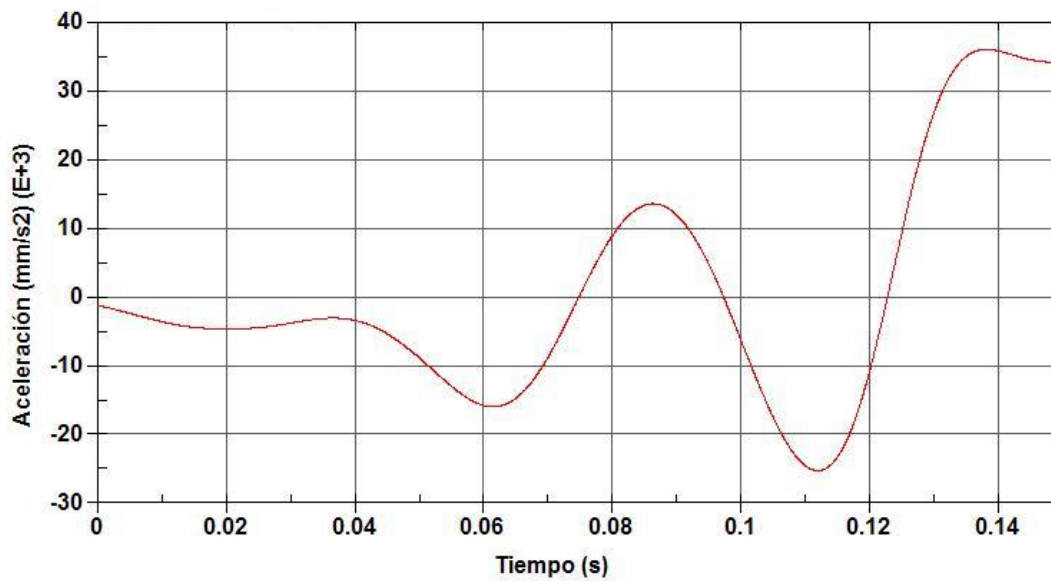


Figura 29: Gráfica de aceleración en dirección x, Caso A.

Con la simulación y los resultados obtenidos en las gráficas se puede estimar el instante en el cual el vehículo entra en contacto con la señal. En el instante de 42 ms se puede apreciar una deceleración brusca llegando a un máximo que corresponde en el momento en el cual el vehículo consigue dividir la señal en dos partes.

Para el cálculo del índice ASI se tiene que tomar un intervalo de tiempo de 50 ms desde el primer contacto. Este intervalo de tiempo es desde el instante  $t_1=42$  ms al instante  $t_2=92$  ms. En este intervalo están los valores extremos de deceleración producidos por el impacto frontal.

Con la tabla de resultados obtenida de la gráfica de velocidad que proporcionan LS-PrePost se puede calcular la aceleración en el intervalo de tiempo deseado para el cálculo del índice ASI. Para calcular dicha aceleración se utiliza la siguiente ecuación del movimiento rectilíneo uniformemente acelerado:

$$V_{t1} = V_{t2} + \bar{a}_x \cdot t \quad \text{Ecuación 3.}$$

Donde:

$V_{t1}$  : Velocidad del vehículo en el primer contacto en mm/s.

$V_{t2}$  : Velocidad del vehículo 50 ms después del primer contacto en mm/s.



$\bar{a}_x$  : Aceleración media durante los 50 ms en  $\text{mm/s}^2$ .

$t$  : Intervalo de tiempo de 0,05 s desde el primer contacto.

A partir de la ecuación 3 con  $V_{t1} = 17,628 \text{ m/s}$  y  $V_{t2} = 17,465 \text{ m/s}$ , se obtiene el valor de la aceleración en dirección “x”:

$$\bar{a}_x = \frac{17,628 \text{ m/s} - 17,465 \text{ m/s}}{0,05 \text{ s}} = 3,26 \text{ m/s}^2 = 0,33g$$

Como se trata de un impacto frontal se puede asumir que las aceleraciones en dirección lateral como vertical son prácticamente insignificantes para la hora de calcular el índice ASI. En las figuras 30 y 31 se pueden observar las graficas obtenidas de la velocidad en la dirección “y” como la “z” para demostrar la simplificación de los cálculos.

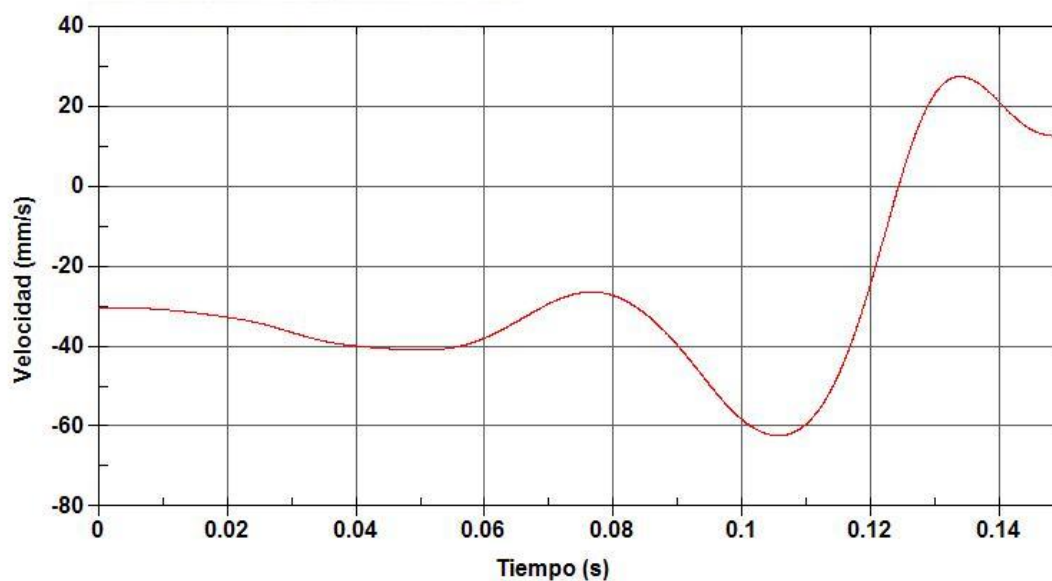


Figura 30: Gráfica de velocidad en dirección y, Caso A.



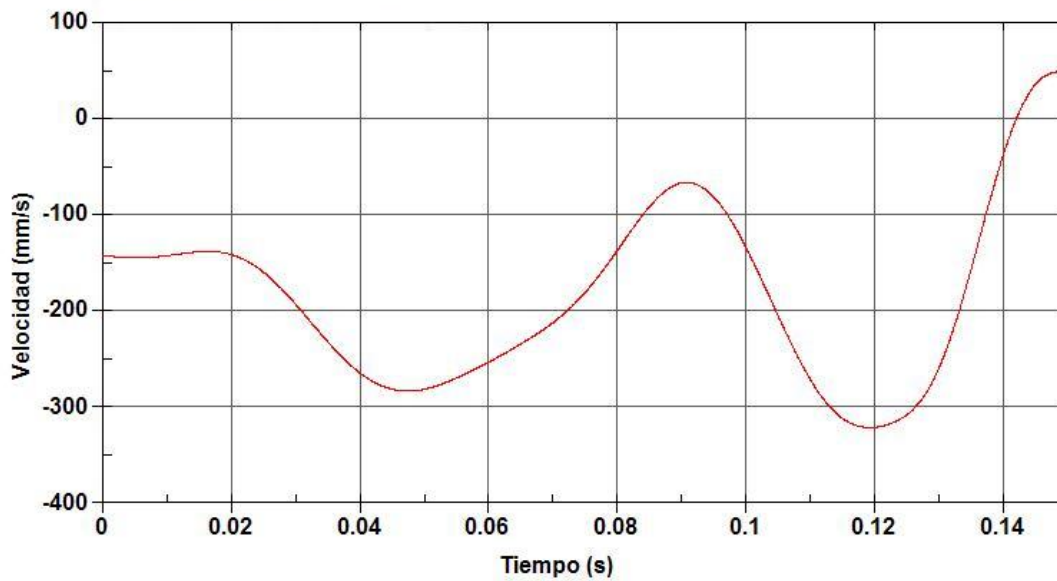


Figura 31: Gráfica de velocidad en dirección z, Caso A.

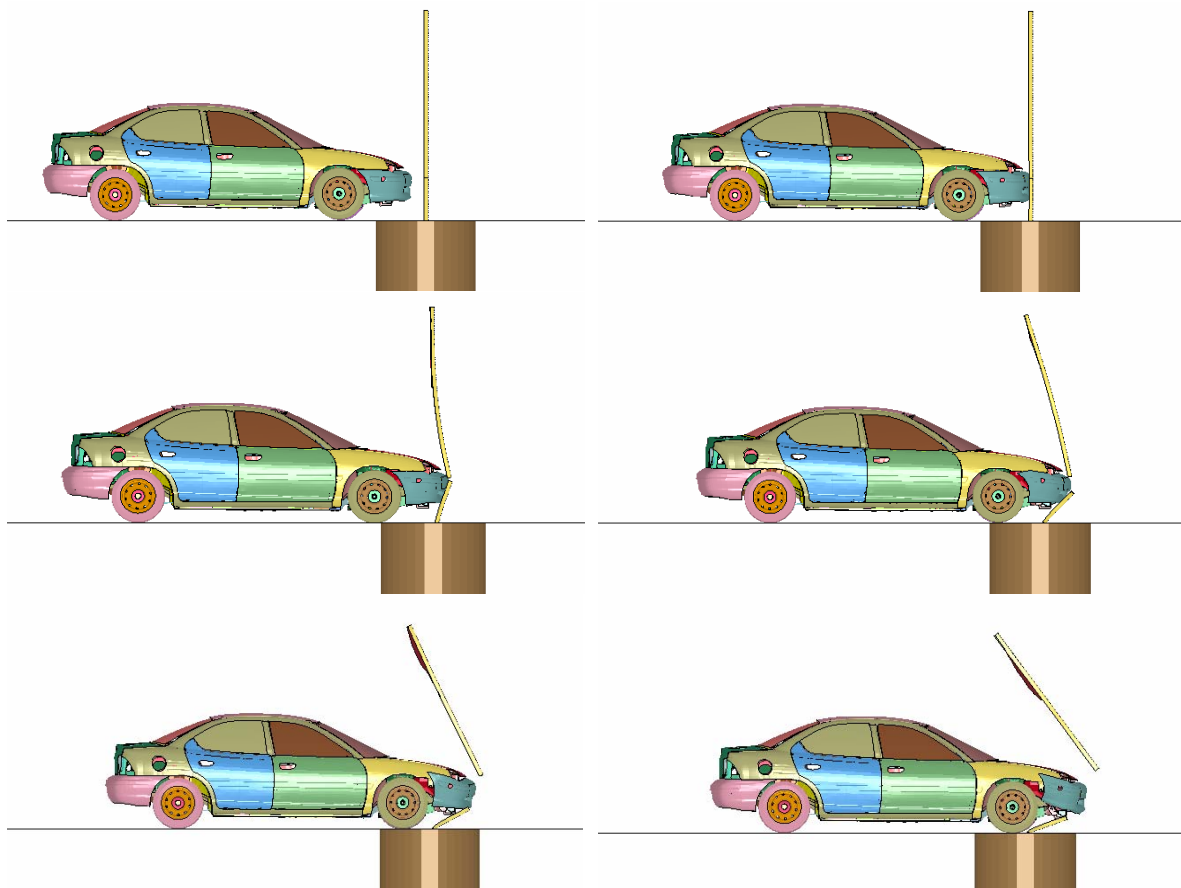
Con el valor de la aceleración en dirección “x” se calcula el índice ASI a partir de la ecuación 2 descrita en el capítulo anterior:

$$ASI(t) = \sqrt{\left(\frac{0,33g}{12g}\right)^2} = 0,027$$

El resultado obtenido no supera el máximo permitido por la norma europea EN 1317. El índice ASI calculado ha sido inferior a 1 por lo que se trata de un choque del tipo “lesiones leves”. En este tipo de impactos la norma razona que el riesgo de lesiones para los ocupantes del vehículo es mínimo, teniendo como máximo heridas leves.

## **7.2. CASO B: CHOQUE FRONTAL DEL VEHÍCULO B CONTRA LA SEÑAL PEQUEÑA**

En el segundo caso, se simula un choque frontal del vehículo Dodge contra una señal vertical pequeña de tráfico a una velocidad de 64 km/h. El intervalo de tiempo determinado para el análisis de la simulación es de 150 ms con un registro de datos cada 2 ms. El tiempo de paso o *time step* para el paso del análisis explícito dinámico se ha determinado en 1,112  $\mu$ s y la simulación se ha realizado usando el código Ls-Dyna versión 970 [15].



*Figura 32: Secuencia del impacto frontal, Caso B.*

En la figura 32 se muestra la secuencia del impacto de la simulación con una diferencia entre imagen e imagen de 10 ms. La primera imagen se trata del instante de 30 ms antes de producirse el impacto y la segunda imagen se trata del instante de 40 ms cuando el vehículo entra en contacto con la señal. El resto de las imágenes se tratan de los instantes de tiempo 50 ms, 60 ms, 70 ms y 80 ms, cuando el vehículo golpea la señal. El orden de la imagen es de izquierda a derecha y de arriba abajo. Con esta imagen se puede apreciar el impacto producido en la simulación.

Una vez realizada la simulación, se detallan los resultados y se realiza el cálculo del índice ASI. Para el cálculo del índice ASI se usa el acelerómetro instalado en el centro de gravedad del vehículo. Los datos obtenidos del acelerómetro vienen referenciados al sistema de coordenadas del vehículo que coincide con el sistema de referencia del modelo. Las unidades que se obtienen son las definidas al principio de la simulación.

El programa LS-PrePost tiene la capacidad de obtener las gráficas del comportamiento de los acelerómetros. En la figura 33 y 34 se muestran la velocidad y la aceleración del acelerómetro C.d.G. en dirección “x”.

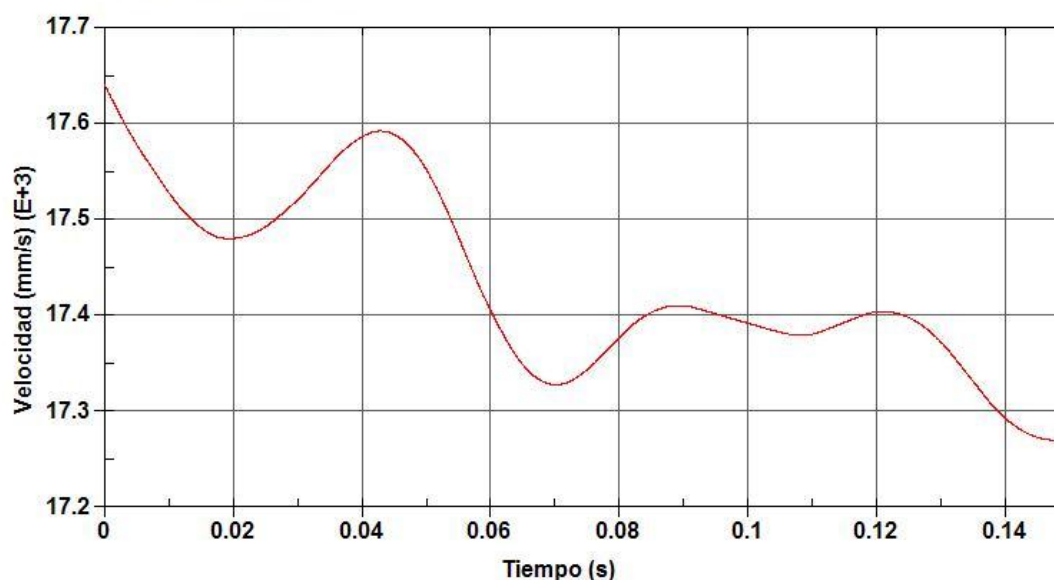


Figura 33: Gráfica de velocidad en dirección x, Caso B.

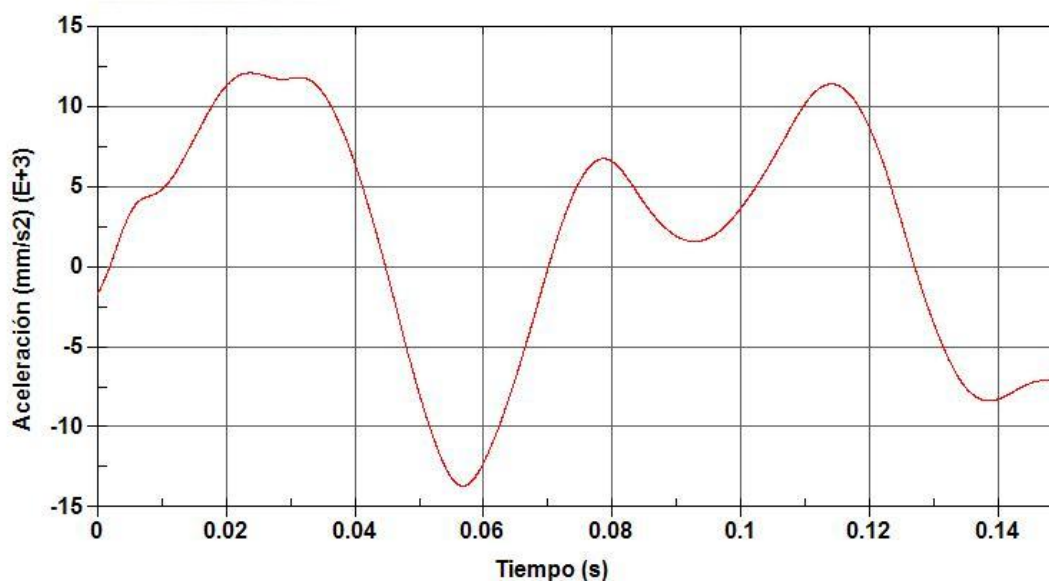


Figura 34: Gráfica de aceleración en dirección x, Caso B.

Con la simulación y los resultados obtenidos en las gráficas se puede estimar el instante en el cual el vehículo entra en contacto con la señal. En el instante de 42 ms se puede apreciar un descenso brusco de la velocidad llegando a un mínimo que corresponde en el momento en el cual el vehículo consigue dividir la señal en dos partes.

Para el cálculo del índice ASI se tiene que tomar un intervalo de tiempo de 50 ms desde el primer contacto. Este intervalo de tiempo es desde el instante  $t_1=42$  ms al instante  $t_2=92$  ms. En este intervalo están los valores extremos de deceleración producidos por el impacto frontal.

Con la tabla de resultados obtenida de la gráfica de velocidad que proporcionan LS-PrePost se puede calcular la aceleración en el intervalo de tiempo deseado para el cálculo del índice ASI. Para calcular dicha aceleración se utiliza la ecuación 3 del movimiento rectilíneo uniformemente acelerado. A partir de dicha ecuación con  $V_{t1} = 17,592 m/s$  y  $V_{t2} = 17,401 m/s$ , se obtiene el valor de la aceleración en dirección “X”:

$$\bar{a}_x = \frac{17,592 \frac{m}{s} - 17,401 \frac{m}{s}}{0,05s} = 3,86 \frac{m}{s^2} = 0,39g$$



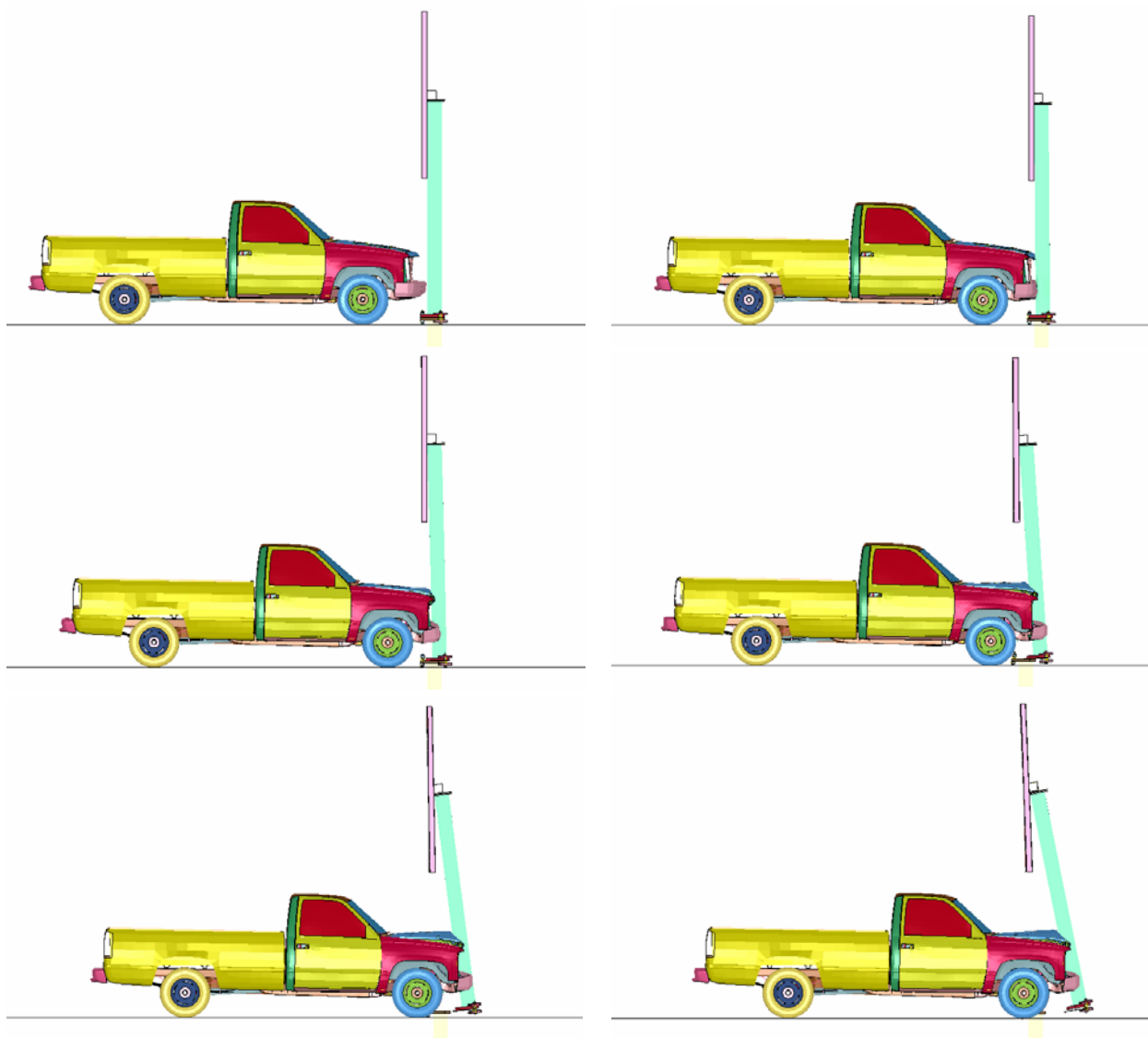
Como se trata de un impacto frontal se puede asumir que las aceleraciones en dirección lateral como vertical son prácticamente insignificantes para la hora de calcular el índice ASI. Con el valor de la aceleración en dirección “x” se calcula el índice ASI a partir de la ecuación 2 descrita en el capítulo anterior:

$$ASI(t) = \sqrt{\left(\frac{0,39g}{12g}\right)^2} = 0,032$$

El resultado obtenido no supera el máximo permitido por la norma europea EN 1317. El índice ASI calculado ha sido inferior a 1 por lo que se trata de un choque del tipo “lesiones leves”. En este tipo de impactos la norma razona que el riesgo de lesiones para los ocupantes del vehículo es mínimo, teniendo como máximo heridas leves.

### **7.3. CASO C: CHOQUE FRONTAL DEL VEHÍCULO A CONTRA LA SEÑAL GRANDE**

En el tercer caso, se simula un choque frontal del vehículo Chevrolet contra una señal vertical grande de tráfico a una velocidad de 64 km/h. El intervalo de tiempo determinado para el análisis de la simulación es de 150 ms con un registro de datos cada 2 ms. El tiempo de paso o *time step* para el paso del análisis explícito dinámico se ha determinado en 1,112  $\mu$ s y la simulación se ha realizado usando el código Ls-Dyna versión 970 [15].



*Figura 35: Secuencia del impacto frontal, Caso C.*

En la figura 35 se muestra la secuencia del impacto de la simulación con una diferencia entre imagen e imagen de 10 ms. La primera imagen se trata del instante de 30 ms antes de producirse el impacto y la segunda imagen se trata del instante de 40 ms cuando el vehículo entra en contacto con la señal. El resto de las imágenes se tratan de los instantes de tiempo 50 ms, 60 ms, 70 ms y 80 ms, cuando el vehículo golpea la señal. El orden de la imagen es de izquierda a derecha y de arriba abajo. Con esta imagen se puede apreciar el impacto producido en la simulación.

Una vez realizada la simulación, se detallan los resultados y se realiza el cálculo del índice ASI. Para el cálculo del índice ASI se usa el acelerómetro instalado en el centro



de gravedad del vehículo. Los datos obtenidos del acelerómetro vienen referenciados al sistema de coordenadas del vehículo que coincide con el sistema de referencia del modelo. Las unidades que se obtienen son las definidas al principio de la simulación.

El programa LS-PrePost tiene la capacidad de obtener las gráficas del comportamiento de los acelerómetros. En la figura 36 y 37 se muestran la velocidad y la aceleración del acelerómetro C.d.G. en dirección “x”.

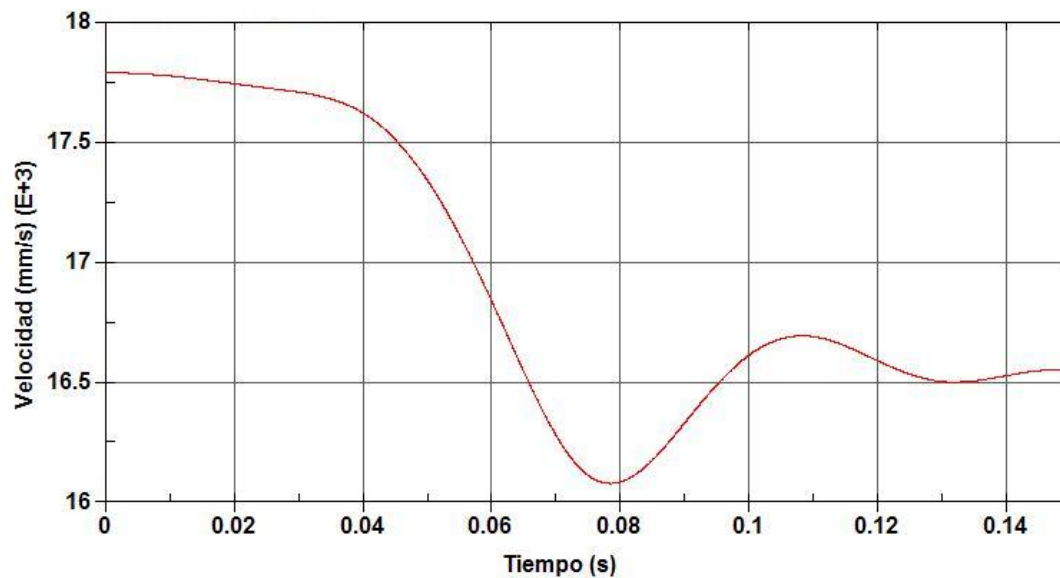


Figura 36: Gráfica de velocidad en dirección x, Caso C.

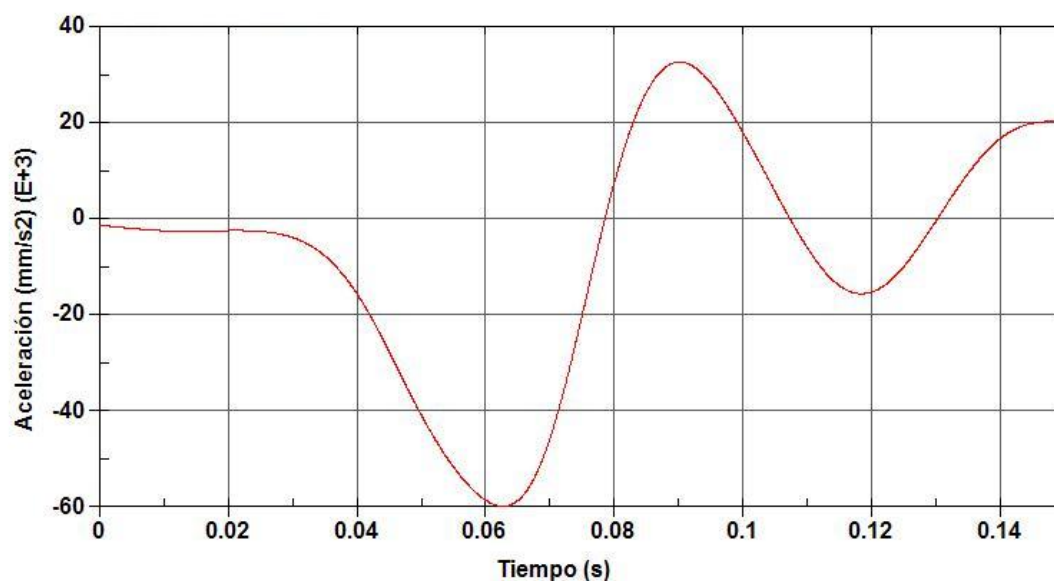


Figura 37: Gráfica de aceleración en dirección x, Caso C.



Con la simulación y los resultados obtenidos en las gráficas se puede estimar el instante en el cual el vehículo entra en contacto con la señal. En el instante de 32 ms se puede apreciar una deceleración brusca llegando a un máximo que corresponde en el momento en el cual el vehículo consigue dividir la señal en dos partes.

Para el cálculo del índice ASI se tiene que tomar un intervalo de tiempo de 50 ms desde el primer contacto. Este intervalo de tiempo es desde el instante  $t_1=32$  ms al instante  $t_2=82$  ms. En este intervalo están los valores extremos de deceleración producidos por el impacto frontal.

Con la tabla de resultados obtenida de la gráfica de velocidad que proporcionan LS-PrePost se puede calcular la aceleración en el intervalo de tiempo deseado para el cálculo del índice ASI. Para calcular dicha aceleración se utiliza la ecuación 3 del movimiento rectilíneo uniformemente acelerado. A partir de dicha ecuación con  $V_{t1} = 17,657 m/s$  y  $V_{t2} = 16,215 m/s$ , se obtiene el valor de la aceleración en dirección “x”:

$$\bar{a}_x = \frac{17,657 m/s - 16,215 m/s}{0,05s} = 28,836 m/s^2 = 2,88g$$

Como se trata de un impacto frontal se puede asumir que las aceleraciones en dirección lateral como vertical son prácticamente insignificantes para la hora de calcular el índice ASI. Con el valor de la aceleración en dirección “x” se calcula el índice ASI a partir de la ecuación 2 descrita en el capítulo anterior:

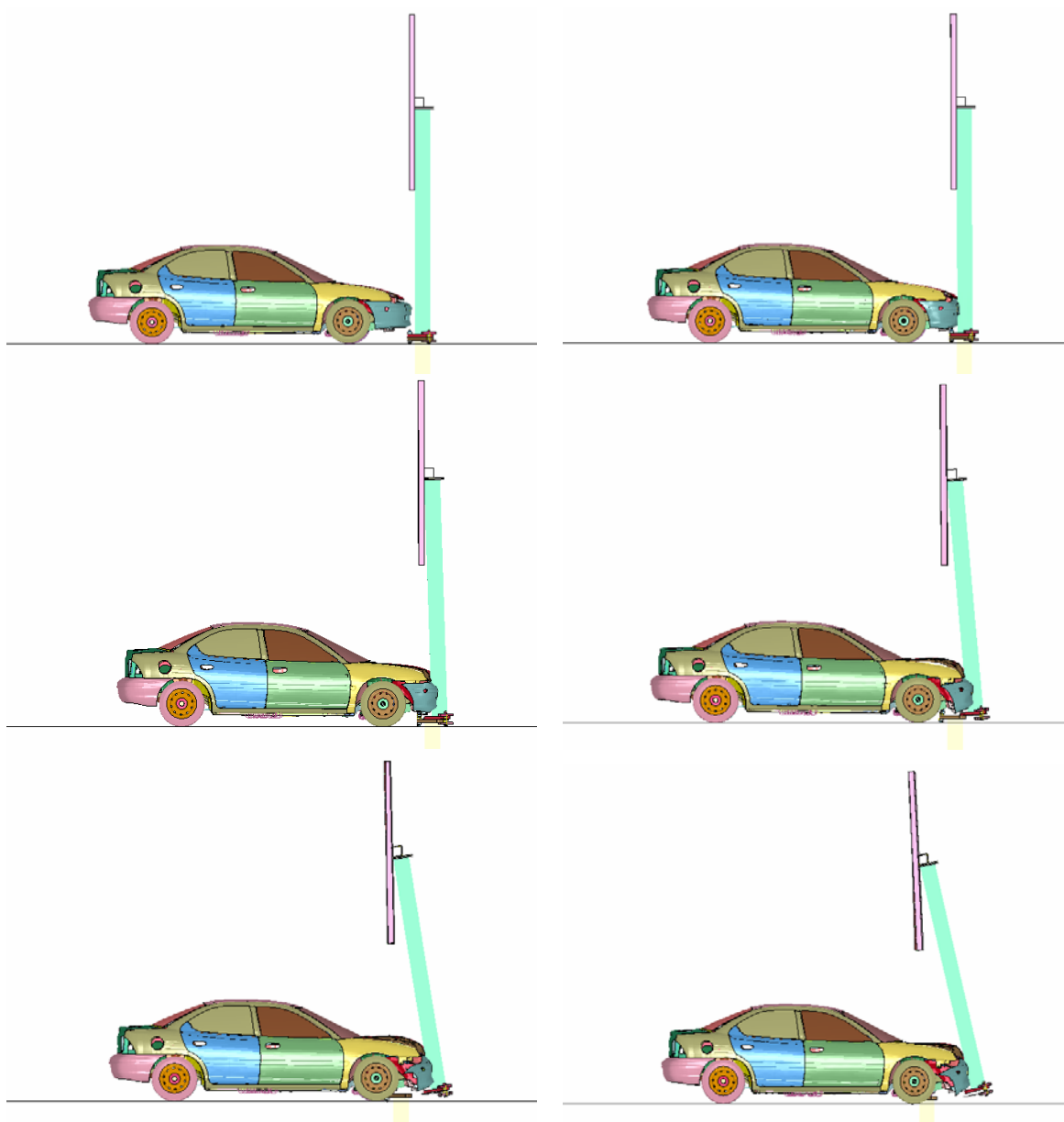
$$ASI(t) = \sqrt{\left(\frac{2,88g}{12g}\right)^2} = 0,24$$

El resultado obtenido no supera el máximo permitido por la norma europea EN 1317. El índice ASI calculado ha sido inferior a 1 por lo que se trata de un choque del tipo “lesiones leves”. En este tipo de impactos la norma razona que el riesgo de lesiones para los ocupantes del vehículo es mínimo, teniendo como máximo heridas leves.



## 7.4. CASO D: CHOQUE FRONTAL DEL VEHÍCULO B CONTRA LA SEÑAL GRANDE

En el cuarto caso, se simula un choque frontal del vehículo Dodge contra una señal grande de tráfico a una velocidad de 64 km/h. El intervalo de tiempo determinado para el análisis de la simulación es de 150 ms con un registro de datos cada 2 ms. El tiempo de paso o *time step* para el paso del análisis explícito dinámico se ha determinado en 1,112  $\mu$ s y la simulación se ha realizado usando el código Ls-Dyna versión 970 [15].

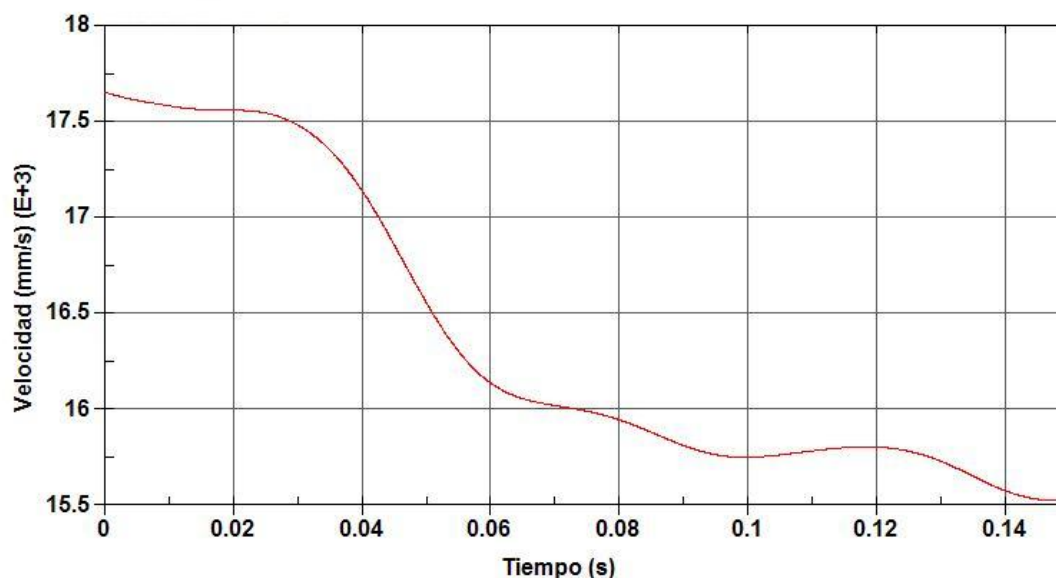


*Figura 38: Secuencia del impacto frontal, Caso D.*

En la figura 38 se muestra la secuencia del impacto de la simulación con una diferencia entre imagen e imagen de 10 ms. La primera imagen se trata del instante de 30 ms antes de producirse el impacto y la segunda imagen se trata del instante de 40 ms cuando el vehículo entra en contacto con la señal. El resto de las imágenes se tratan de los instantes de tiempo 50 ms, 60 ms, 70 ms y 80 ms, cuando el vehículo golpea la señal. El orden de la imagen es de izquierda a derecha y de arriba abajo. Con esta imagen se puede apreciar el impacto producido en la simulación.

Una vez realizada la simulación, se detallan los resultados y se realiza el cálculo del índice ASI. Para el cálculo del índice ASI se usa el acelerómetro instalado en el centro de gravedad del vehículo. Los datos obtenidos del acelerómetro vienen referenciados al sistema de coordenadas del vehículo que coincide con el sistema de referencia del modelo. Las unidades que se obtienen son las definidas al principio de la simulación.

El programa LS-PrePost tiene la capacidad de obtener las gráficas del comportamiento de los acelerómetros. En la figura 39 y 40 se muestran la velocidad y la aceleración del acelerómetro C.d.G. en dirección “x”.



*Figura 39: Gráfica de velocidad en dirección x, Caso D.*

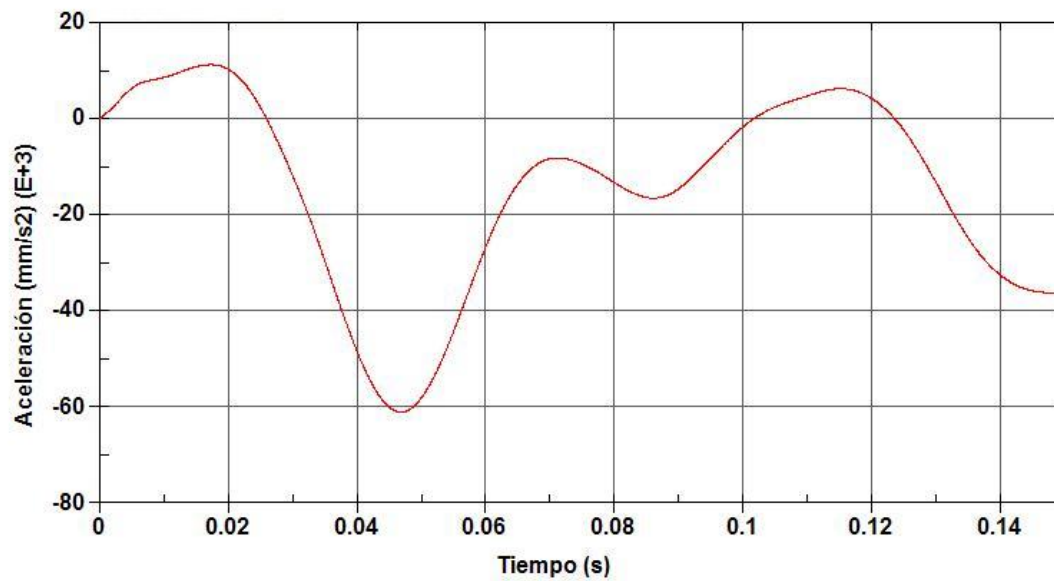


Figura 40: Gráfica de aceleración en dirección x, Caso D.

Con la simulación y los resultados obtenidos en las gráficas se puede estimar el instante en el cual el vehículo entra en contacto con la señal. En el instante de 32 ms se puede apreciar un descenso brusco de la velocidad llegando a una máxima deceleración que corresponde en el momento en el cual el vehículo consigue dividir la señal en dos partes.

Para el cálculo del índice ASI se tiene que tomar un intervalo de tiempo de 50 ms desde el primer contacto. Este intervalo de tiempo es desde el instante  $t_1=32$  ms al instante  $t_2=82$  ms. En este intervalo están los valores extremos de deceleración producidos por el impacto frontal.

Con la tabla de resultados obtenida de la gráfica de velocidad que proporcionan LS-PrePost se puede calcular la aceleración en el intervalo de tiempo deseado para el cálculo del índice ASI. Para calcular dicha aceleración se utiliza la ecuación 3 del movimiento rectilíneo uniformemente acelerado. A partir de dicha ecuación con  $V_{t1}=17,446\text{m/s}$  y  $V_{t2}=15,925\text{m/s}$ , se obtiene el valor de la aceleración en dirección “X”:

$$\bar{a}_x = \frac{17,446\text{m/s} - 15,925\text{m/s}}{0,05\text{s}} = 30,42\text{m/s}^2 = 3,04g$$



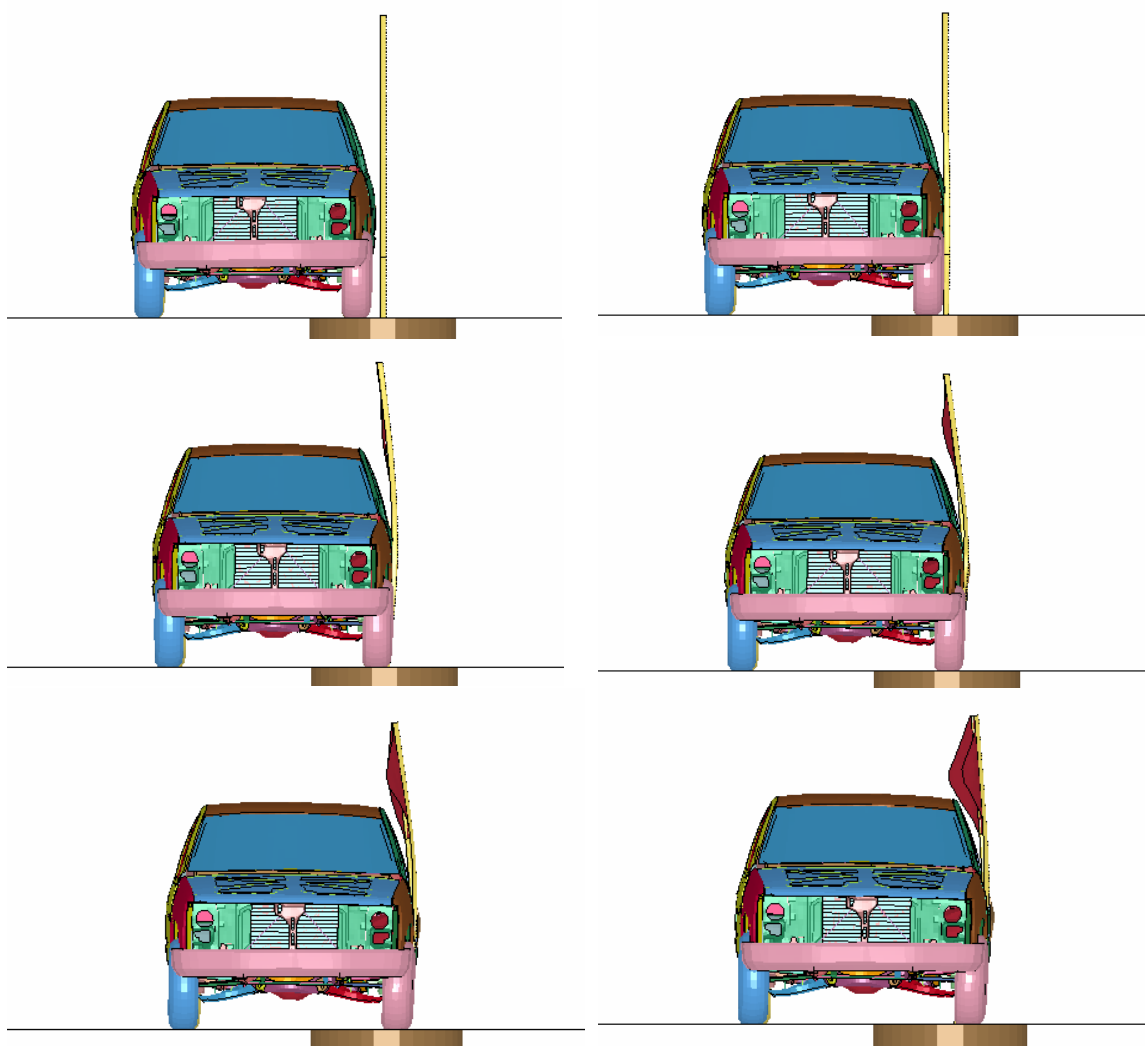
Como se trata de un impacto frontal se puede asumir que las aceleraciones en dirección lateral como vertical son prácticamente insignificantes para la hora de calcular el índice ASI. Con el valor de la aceleración en dirección “x” se calcula el índice ASI a partir de la ecuación 2 descrita en el capítulo anterior:

$$ASI(t) = \sqrt{\left(\frac{3,04g}{12g}\right)^2} = 0,253$$

El resultado obtenido no supera el máximo permitido por la norma europea EN 1317. El índice ASI calculado ha sido inferior a 1 por lo que se trata de un choque del tipo “lesiones leves”. En este tipo de impactos la norma razona que el riesgo de lesiones para los ocupantes del vehículo es mínimo, teniendo como máximo heridas leves.

## **7.5. CASO E: CHOQUE LATERAL DEL VEHÍCULO A CONTRA LA SEÑAL PEQUEÑA**

En el quinto caso, se simula un choque lateral del vehículo Chevrolet contra una señal vertical pequeña de tráfico a una velocidad de 29 km/h. El intervalo de tiempo determinado para el análisis de la simulación es de 150 ms con un registro de datos cada 2 ms. El tiempo de paso o *time step* para el paso del análisis explícito dinámico se ha determinado en 1,112  $\mu$ s y la simulación se ha realizado usando el código Ls-Dyna versión 970 [15].



*Figura 41: Secuencia del impacto lateral, Caso E.*

En la figura 41 se muestra la secuencia del impacto de la simulación con una diferencia entre imagen e imagen de 10 ms. La primera imagen se trata del instante de 60 ms antes de producirse el impacto y la segunda imagen se trata del instante de 70 ms cuando el vehículo entra en contacto con la señal. El resto de las imágenes se tratan del instante de tiempo 80 ms, 90 ms, 100 ms y 110 ms, cuando el vehículo golpea la señal. El orden de la imagen es de izquierda a derecha y de arriba abajo. Gracias a esta imagen se puede apreciar el impacto producido en la simulación.

Una vez realizada la simulación, se detallan los resultados y se realiza el cálculo del índice ASI. Este índice ha sido explicado en el capítulo anterior según la norma europea EN 1317. El vehículo tiene instalados varios acelerómetros como se ha mencionado en el capítulo 5. Para el cálculo del índice ASI se usa el acelerómetro instalado en el centro

de gravedad del vehículo. Los datos obtenidos del acelerómetro vienen referenciados al sistema de coordenadas del vehículo que coincide con el sistema de referencia del modelo. Las unidades que se obtienen son las definidas al principio de la simulación.

El programa LS-PrePost tiene la capacidad de obtener las gráficas del comportamiento de los acelerómetros. En la figura 42 y 43 se muestran la velocidad y la aceleración del acelerómetro C.d.G. en dirección “y”.

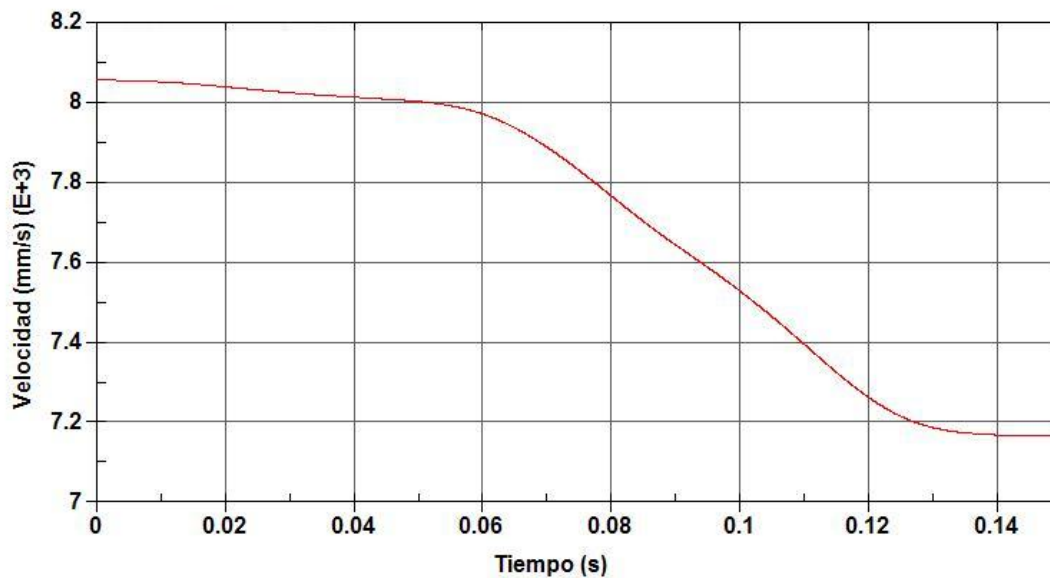


Figura 42: Gráfica de velocidad en dirección y, Caso E.

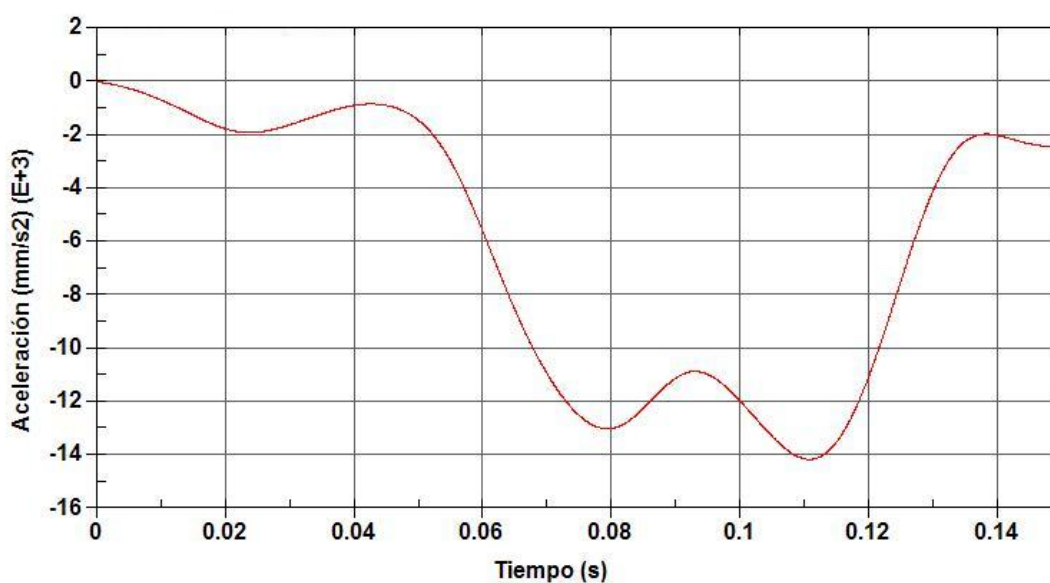


Figura 43: Gráfica de aceleración en dirección y, Caso E.



Con la simulación y los resultados obtenidos en las gráficas se puede estimar el instante en el cual el vehículo entra en contacto con la señal. En el instante de 62 ms se puede apreciar un descenso brusco de la velocidad llegando a una máxima deceleración.

Para el cálculo del índice ASI se tiene que tomar un intervalo de tiempo de 50 ms desde el primer contacto. Este intervalo de tiempo es desde el instante  $t_1=62$  ms al instante  $t_2=112$  ms. En este intervalo están los valores extremos de deceleración producidos por el impacto lateral.

Con la tabla de resultados obtenida de la gráfica de velocidad que proporcionan LS-PrePost se puede calcular la aceleración en el intervalo de tiempo deseado para el cálculo del índice ASI. Para calcular dicha aceleración se utiliza la ecuación 3 del movimiento rectilíneo uniformemente acelerado. A partir de dicha ecuación con  $V_{t1} = 7,962 m/s$  y  $V_{t2} = 7,265 m/s$ , se obtiene el valor de la aceleración en dirección “y”:

$$\bar{a}_y = \frac{7,962 m/s - 7,265 m/s}{0,05s} = 13,94 m/s^2 = 1,39g$$

Como se trata de un impacto lateral se puede asumir que las aceleraciones en dirección longitudinal como vertical son prácticamente insignificantes para la hora de calcular el índice ASI. En las figuras 44 y 45 se pueden observar las graficas obtenidas de la velocidad en la dirección “x” como la “z” para demostrar la simplificación de los cálculos.

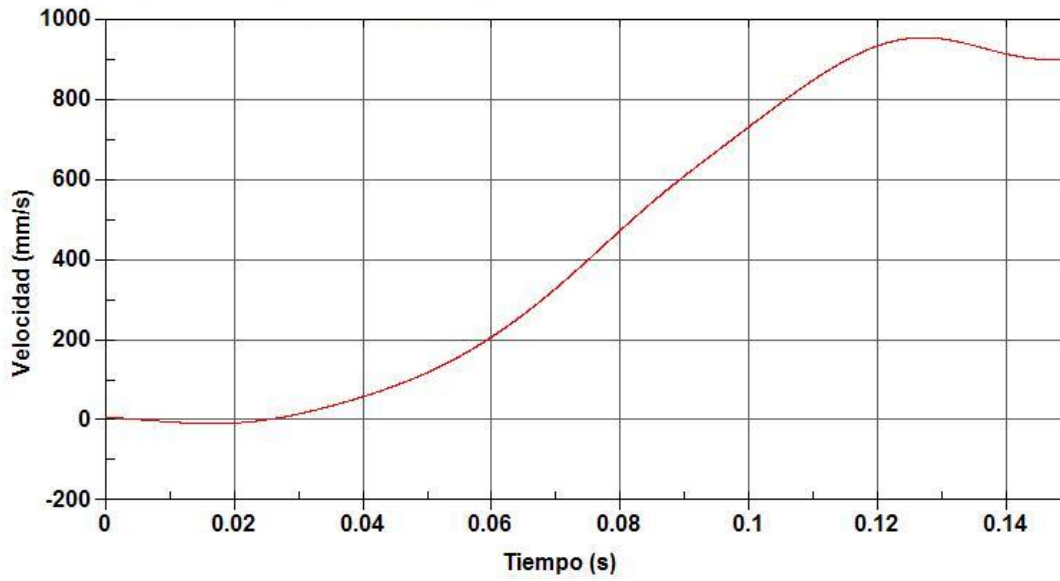


Figura 44: Gráfica de velocidad en dirección x, Caso E.

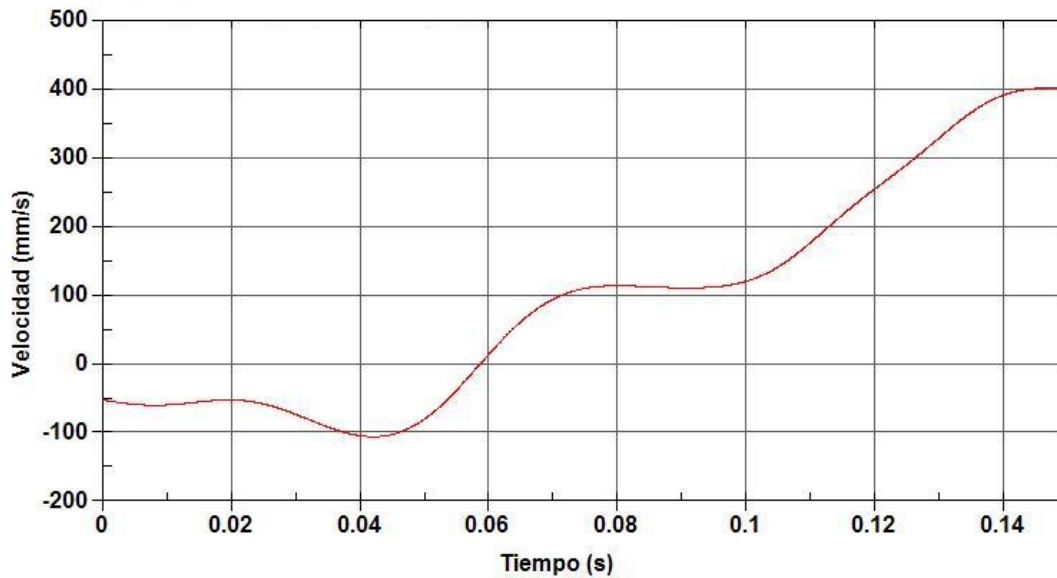


Figura 45: Gráfica de velocidad en dirección z, Caso E.

Con el valor de la aceleración en dirección “y” se calcula el índice ASI a partir de la ecuación 2 descrita en el capítulo anterior:

$$ASI(t) = \sqrt{\left(\frac{1,39g}{9g}\right)^2} = 0,154$$

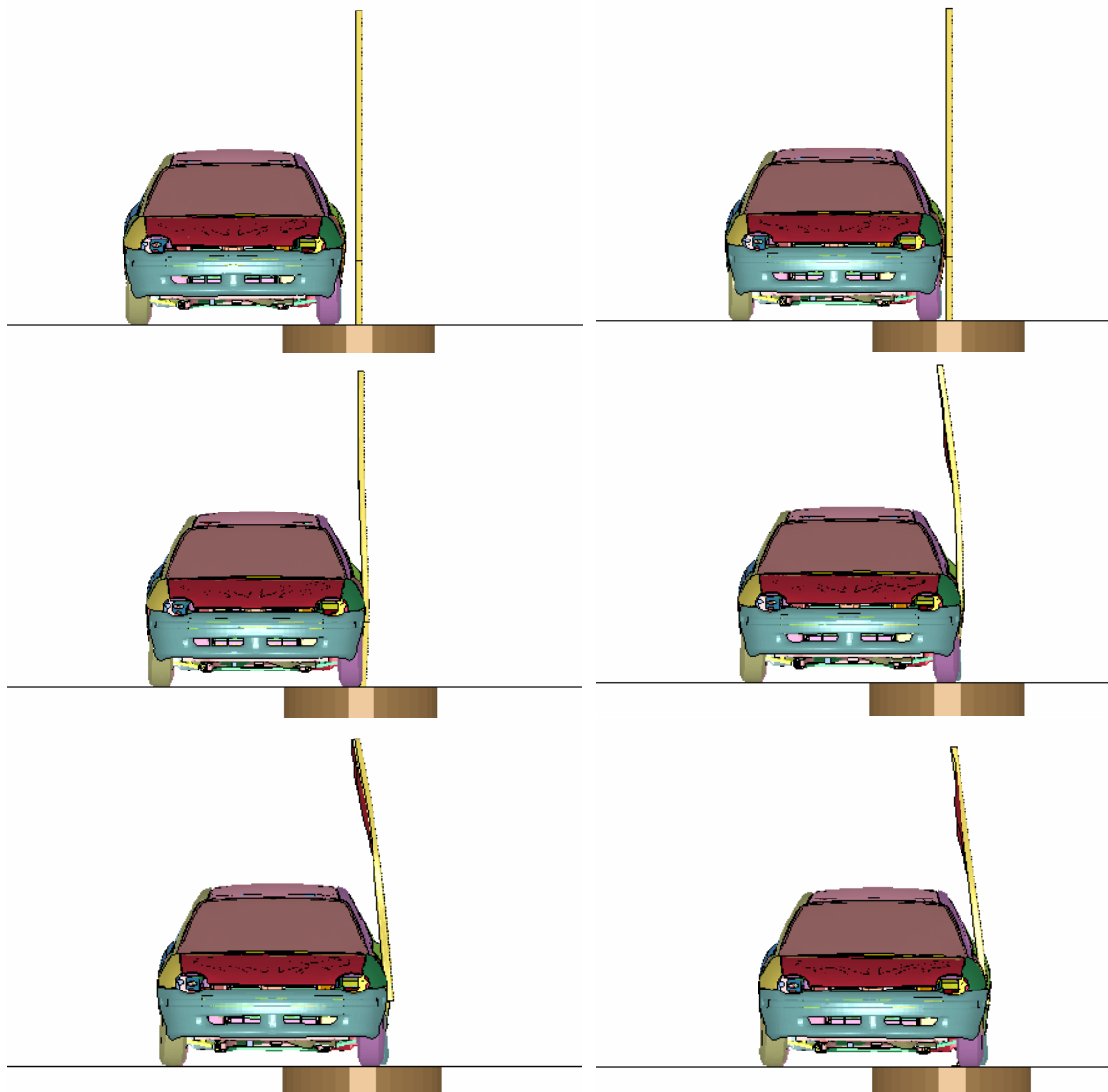




El resultado obtenido no supera el máximo permitido por la norma europea EN 1317. El índice ASI calculado ha sido inferior a 1 por lo que se trata de un choque del tipo “lesiones leves”. En este tipo de impactos la norma razona que el riesgo de lesiones para los ocupantes del vehículo es mínimo, teniendo como máximo heridas leves.

## **7.6. CASO F: CHOQUE LATERAL DEL VEHÍCULO B CONTRA LA SEÑAL PEQUEÑA**

En el sexto caso, se simula un choque lateral del vehículo Dodge contra una señal vertical pequeña de tráfico a una velocidad de 29 km/h. El intervalo de tiempo determinado para el análisis de la simulación es de 150 ms con un registro de datos cada 2 ms. El tiempo de paso o *time step* para el paso del análisis explícito dinámico se ha determinado en 1,112  $\mu$ s y la simulación se ha realizado usando el código Ls-Dyna versión 970 [15].



*Figura 46: Secuencia del impacto lateral, Caso F.*

En la figura 46 se muestra la secuencia del impacto de la simulación con una diferencia entre imagen e imagen de 10 ms. La primera imagen se trata del instante de 50 ms antes de producirse el impacto y la segunda imagen se trata del instante de 60 ms cuando el vehículo entra en contacto con la señal. El resto de las imágenes se tratan de los instantes de tiempo 70 ms, 80 ms, 90 ms y 100 ms, cuando el vehículo golpea la señal. El orden de la imagen es de izquierda a derecha y de arriba abajo. Gracias a esta imagen se puede apreciar el impacto producido en la simulación.

Una vez realizada la simulación, se detallan los resultados y se realiza el cálculo del índice ASI. Para el cálculo del índice ASI se usa el acelerómetro instalado en el centro

de gravedad del vehículo. Los datos obtenidos del acelerómetro vienen referenciados al sistema de coordenadas del vehículo que coincide con el sistema de referencia del modelo. Las unidades que se obtienen son las definidas al principio de la simulación.

El programa LS-PrePost tiene la capacidad de obtener las gráficas del comportamiento de los acelerómetros. En la figura 47 y 48 se muestran la velocidad y la aceleración del acelerómetro C.d.G. en dirección “y”.

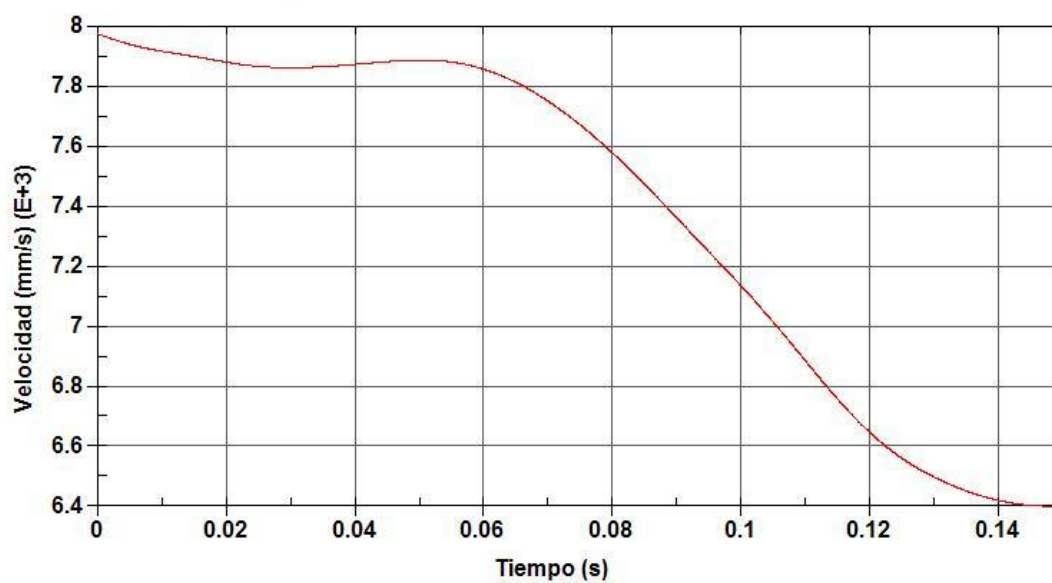


Figura 47: Gráfica de velocidad en dirección y, Caso F.

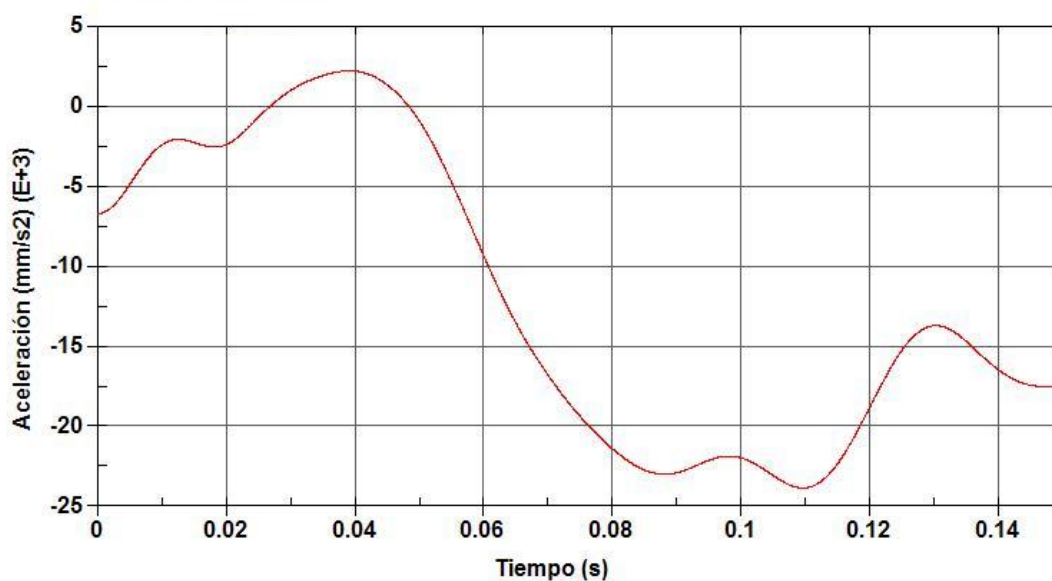


Figura 48: Gráfica de aceleración en dirección y, Caso F.



Con la simulación y los resultados obtenidos en las gráficas se puede estimar el instante en el cual el vehículo entra en contacto con la señal. En el instante de 58 ms se puede apreciar un descenso brusco de la velocidad llegando a una máxima deceleración.

Para el cálculo del índice ASI se tiene que tomar un intervalo de tiempo de 50 ms desde el primer contacto. Este intervalo de tiempo es desde el instante  $t_1=58$  ms al instante  $t_2=108$  ms. En este intervalo están los valores extremos de deceleración producidos por el impacto lateral.

Con la tabla de resultados obtenida de la gráfica de velocidad que proporcionan LS-PrePost se puede calcular la aceleración en el intervalo de tiempo deseado para el cálculo del índice ASI. Para calcular dicha aceleración se utiliza la ecuación 3 del movimiento rectilíneo uniformemente acelerado. A partir de dicha ecuación con  $V_{t1} = 7,874 m/s$  y  $V_{t2} = 6,943 m/s$ , se obtiene el valor de la aceleración en dirección “y”:

$$\bar{a}_y = \frac{7,874 m/s - 6,943 m/s}{0,05s} = 18,604 m/s^2 = 1,86g$$

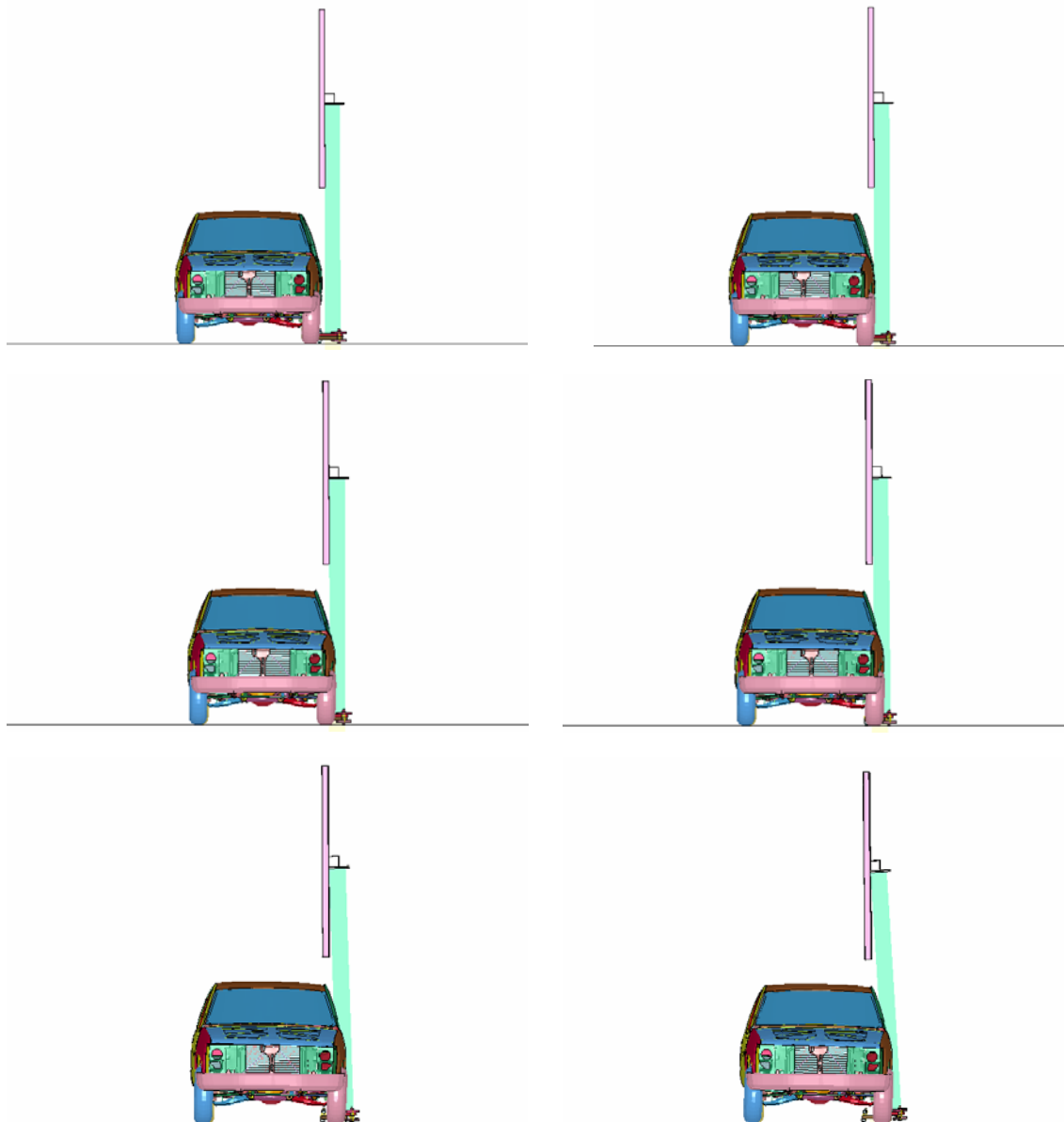
Como se trata de un impacto lateral se puede asumir que las aceleraciones en dirección longitudinal como vertical son prácticamente insignificantes para la hora de calcular el índice ASI. Con el valor de la aceleración en dirección “y” se calcula el índice ASI a partir de la ecuación 2 descrita en el capítulo anterior:

$$ASI(t) = \sqrt{\left(\frac{1,86g}{9g}\right)^2} = 0,207$$

El resultado obtenido no supera el máximo permitido por la norma europea EN 1317. El índice ASI calculado ha sido inferior a 1 por lo que se trata de un choque del tipo “lesiones leves”. En este tipo de impactos la norma razona que el riesgo de lesiones para los ocupantes del vehículo es mínimo, teniendo como máximo heridas leves.

## **7.7. CASO G: COCHE LATERAL DEL VEHÍCULO A CONTRA LA SEÑAL GRANDE**

En el séptimo caso, se simula un choque lateral del vehículo Chevrolet contra una señal vertical grande de tráfico a una velocidad de 29 km/h. El intervalo de tiempo determinado para el análisis de la simulación es de 150 ms con un registro de datos cada 2 ms. El tiempo de paso o *time step* para el paso del análisis explícito dinámico se ha determinado en 1,112  $\mu$ s y la simulación se ha realizado usando el código Ls-Dyna versión 970 [15].



*Figura 49: Secuencia del impacto lateral, Caso G.*

En la figura 49 se muestra la secuencia del impacto de la simulación con una diferencia entre imagen e imagen de 10 ms. La primera imagen se trata del instante de 60 ms antes de producirse el impacto y la segunda imagen se trata del instante de 70 ms cuando el vehículo entra en contacto con la señal. El resto de las imágenes se tratan de los instantes de tiempo 80 ms, 90 ms, 100 ms y 110 ms, cuando el vehículo golpea la señal. El orden de la imagen es de izquierda a derecha y de arriba abajo. Gracias a esta imagen se puede apreciar el impacto producido en la simulación.

Una vez realizada la simulación, se detallan los resultados y se realiza el cálculo del índice ASI. Para el cálculo del índice ASI se usa el acelerómetro instalado en el centro de gravedad del vehículo. Los datos obtenidos del acelerómetro vienen referenciados al sistema de coordenadas del vehículo que coincide con el sistema de referencia del modelo. Las unidades que se obtienen son las definidas al principio de la simulación.

El programa LS-PrePost tiene la capacidad de obtener las gráficas del comportamiento de los acelerómetros. En la figura 50 y 51 se muestran la velocidad y la aceleración del acelerómetro C.d.G. en dirección “y”.

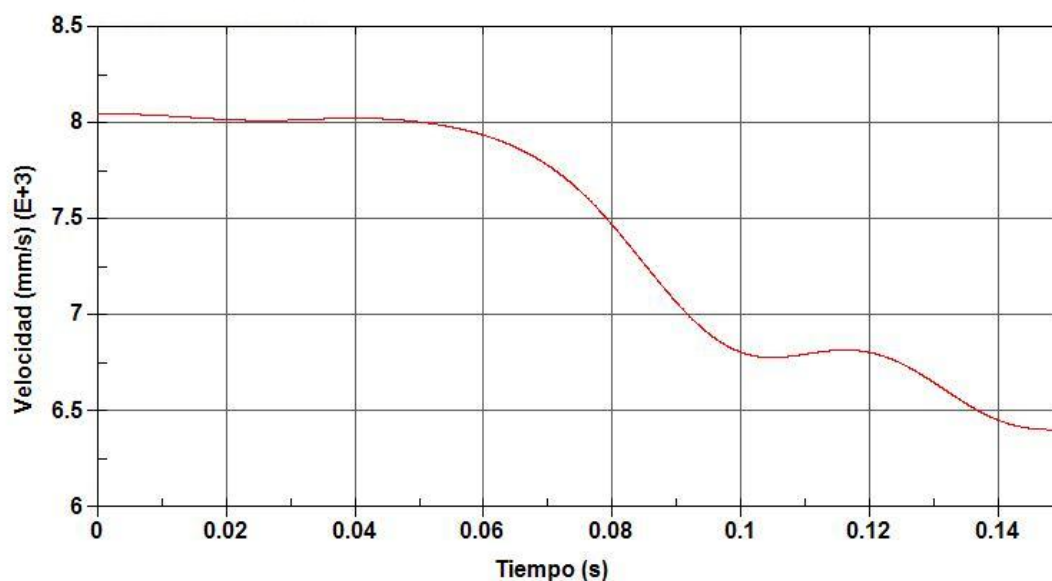


Figura 50: Gráfica de velocidad en dirección y, Caso G.

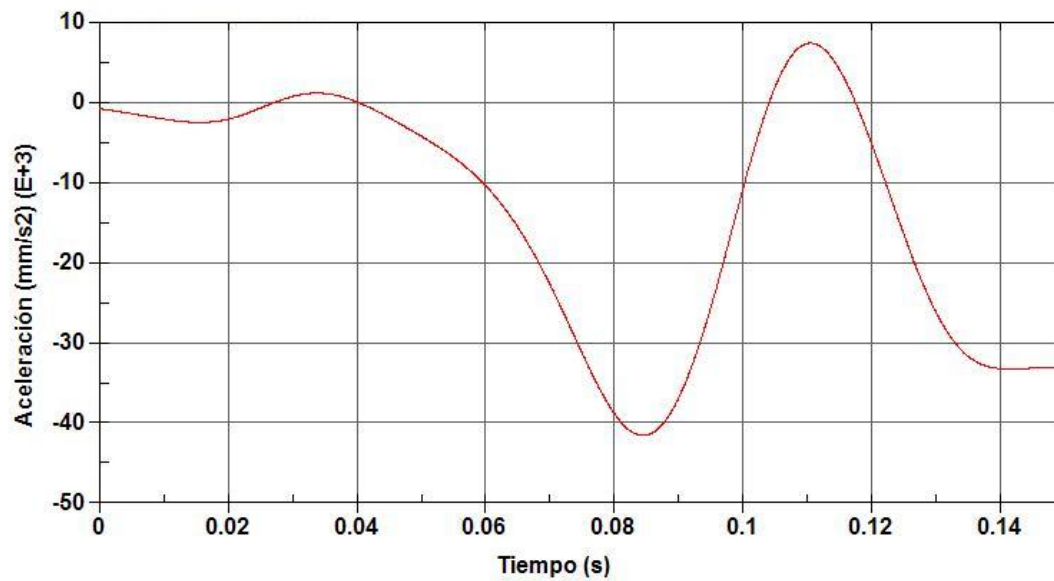


Figura 51: Gráfica de aceleración en dirección y, Caso G.

Con la simulación y los resultados obtenidos en las gráficas se puede estimar el instante en el cual el vehículo entra en contacto con la señal. En el instante de 62 ms se puede apreciar un descenso brusco de la velocidad llegando a una máxima deceleración que corresponde en el momento en el cual el vehículo consigue dividir la señal en dos partes.

Para el cálculo del índice ASI se tiene que tomar un intervalo de tiempo de 50 ms desde el primer contacto. Este intervalo de tiempo es desde el instante  $t_1=62$  ms al instante  $t_2=112$  ms. En este intervalo están los valores extremos de deceleración producidos por el impacto lateral.

Con la tabla de resultados obtenida de la gráfica de velocidad que proporcionan LS-PrePost se puede calcular la aceleración en el intervalo de tiempo deseado para el cálculo del índice ASI. Para calcular dicha aceleración se utiliza la ecuación 3 del movimiento rectilíneo uniformemente acelerado. A partir de dicha ecuación con  $V_{t1} = 7,923m/s$  y  $V_{t2} = 6,853m/s$ , se obtiene el valor de la aceleración en dirección “y”:

$$\bar{a}_y = \frac{7,923 \frac{m}{s} - 6,853 \frac{m}{s}}{0,05s} = 21,393 \frac{m}{s^2} = 2,14g$$



Como se trata de un impacto lateral se puede asumir que las aceleraciones en dirección longitudinal como vertical son prácticamente insignificantes para la hora de calcular el índice ASI. Con el valor de la aceleración en dirección “y” se calcula el índice ASI a partir de la ecuación 2 descrita en el capítulo anterior:

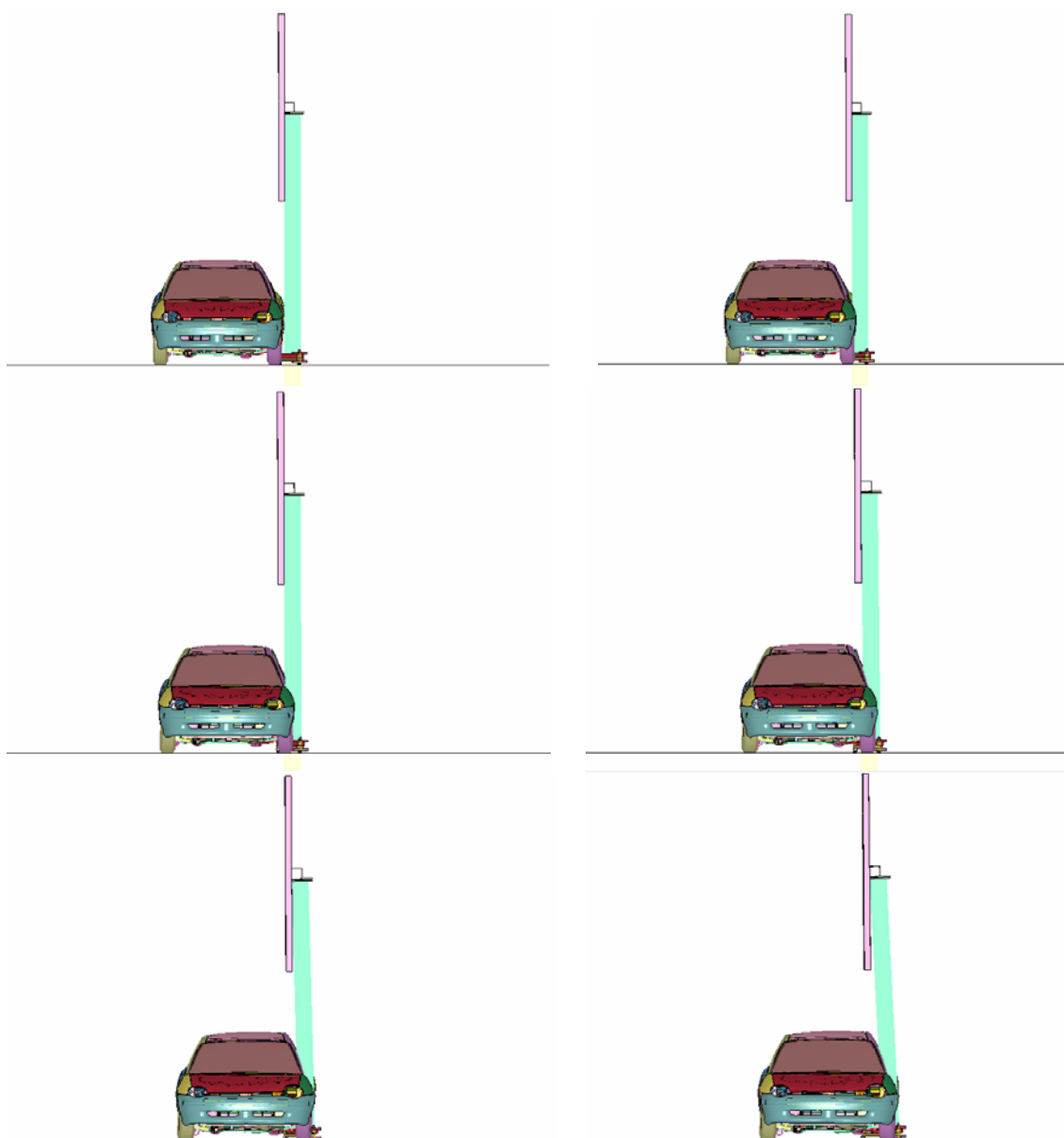
$$ASI(t) = \sqrt{\left(\frac{2,14g}{9g}\right)^2} = 0,238$$

El resultado obtenido no supera el máximo permitido por la norma europea EN 1317. El índice ASI calculado ha sido inferior a 1 por lo que se trata de un choque del tipo “lesiones leves”. En este tipo de impactos la norma razona que el riesgo de lesiones para los ocupantes del vehículo es mínimo, teniendo como máximo heridas leves.

## **7.8. CASO H: COCHE LATERAL DEL VEHÍCULO B CONTRA LA SEÑAL GRANDE**

En el octavo caso, se simula un choque lateral del vehículo Dodge contra una señal vertical grande de tráfico a una velocidad de 29 km/h. El intervalo de tiempo determinado para el análisis de la simulación es de 150 ms con un registro de datos cada 2 ms. El tiempo de paso o *time step* para el paso del análisis explícito dinámico se ha determinado en 1,112  $\mu$ s y la simulación se ha realizado usando el código Ls-Dyna versión 970 [15].





*Figura 52: Secuencia del impacto lateral, Caso H.*

En la figura 52 se muestra la secuencia del impacto de la simulación con una diferencia entre imagen e imagen de 10 ms. La primera imagen se trata del instante de 60 ms antes de producirse el impacto y la segunda imagen se trata del instante de 70 ms cuando el vehículo entra en contacto con la señal. El resto de las imágenes se tratan de los instantes de tiempo 80 ms, 90 ms, 100 ms y 110 ms, cuando el vehículo golpea la señal. El orden de la imagen es de izquierda a derecha y de arriba abajo. Gracias a esta imagen se puede apreciar el impacto producido en la simulación.



Una vez realizada la simulación, se detallan los resultados y se realiza el cálculo del índice ASI. Para el cálculo del índice ASI se usa el acelerómetro instalado en el centro de gravedad del vehículo. Los datos obtenidos del acelerómetro vienen referenciados al sistema de coordenadas del vehículo que coincide con el sistema de referencia del modelo. Las unidades que se obtienen son las definidas al principio de la simulación.

El programa LS-PrePost tiene la capacidad de obtener las gráficas del comportamiento de los acelerómetros. En la figura 53 y 54 se muestran la velocidad y la aceleración del acelerómetro C.d.G. en dirección “y”.

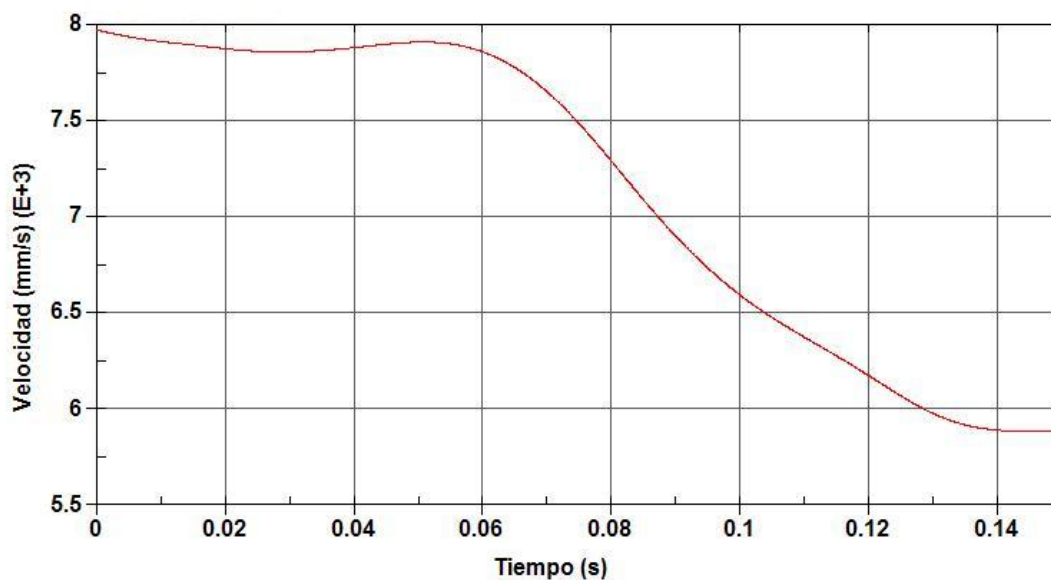


Figura 53: Gráfica de velocidad en dirección y, Caso H.

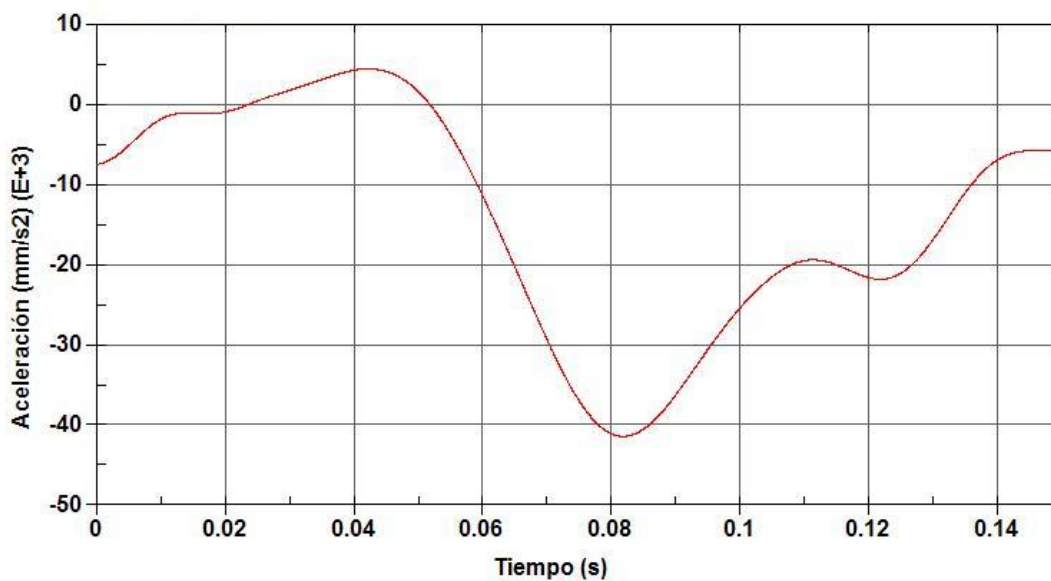


Figura 54: Gráfica de aceleración en dirección y, Caso H.



Con la simulación y los resultados obtenidos en las gráficas se puede estimar el instante en el cual el vehículo entra en contacto con la señal. En el instante de 62 ms se puede apreciar un descenso brusco de la velocidad llegando a una máxima deceleración que corresponde en el momento en el cual el vehículo consigue dividir la señal en dos partes.

Para el cálculo del índice ASI se tiene que tomar un intervalo de tiempo de 50 ms desde el primer contacto. Este intervalo de tiempo es desde el instante  $t_1=62$  ms al instante  $t_2=112$  ms. En este intervalo están los valores extremos de deceleración producidos por el impacto lateral.

Con la tabla de resultados obtenida de la gráfica de velocidad que proporcionan LS-PrePost se puede calcular la aceleración en el intervalo de tiempo deseado para el cálculo del índice ASI. Para calcular dicha aceleración se utiliza la ecuación 3 del movimiento rectilíneo uniformemente acelerado. A partir de dicha ecuación con  $V_{t1}=7,838m/s$  y  $V_{t2}=6,341m/s$ , se obtiene el valor de la aceleración en dirección “y”:

$$\bar{a}_y = \frac{7,838 \frac{m}{s} - 6,341 \frac{m}{s}}{0,05s} = 29,928 \frac{m}{s^2} = 2,99g$$

Como se trata de un impacto lateral se puede asumir que las aceleraciones en dirección longitudinal como vertical son prácticamente insignificantes para la hora de calcular el índice ASI. Con el valor de la aceleración en dirección “y” se calcula el índice ASI a partir de la ecuación 2 descrita en el capítulo anterior:

$$ASI(t) = \sqrt{\left(\frac{2,99g}{9g}\right)^2} = 0,332$$

El resultado obtenido no supera el máximo permitido por la norma europea EN 1317. El índice ASI calculado ha sido inferior a 1 por lo que se trata de un choque del tipo “lesiones leves”. En este tipo de impactos la norma razona que el riesgo de lesiones para los ocupantes del vehículo es mínimo, teniendo como máximo heridas leves.



## **7.9. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS**

Una vez obtenidos los resultados de los ocho casos, se procede a compararlos para realizar las conclusiones entre los dos vehículos.

Como se ha podido observar en los apartados anteriores, el índice ASI es bajo en todos los casos, pero con una variación entre ellos en función del tipo de señal y del tipo de vehículo utilizado. En la tabla 32 se muestran resumidos los resultados de los ocho simulaciones realizadas.

|   | <b>Chevrolet</b> | <b>Dodge</b> |
|---|------------------|--------------|
| <b>Impacto frontal contra señal pequeña</b> | 0,027            | 0,032        |
| <b>Impacto frontal contra señal grande</b>  | 0,240            | 0,253        |
| <b>Impacto lateral contra señal pequeña</b> | 0,154            | 0,207        |
| <b>Impacto lateral contra señal grande</b>  | 0,238            | 0,332        |

*Tabla 32: Resultados de los casos, Índice ASI.*

A partir de estos resultados se puede concluir que, en el impacto frontal con la señal pequeña como con la señal grande, el índice ASI es prácticamente similar en ambos vehículos. En el impacto frontal con la señal grande, el índice ASI es nueve veces mayor que con la señal pequeña. Esta diferencia es debida a las dimensiones y la geometría de los postes utilizados en las señales, definidos en los apartados 5.3 y 5.4. La señal pequeña tiene una gran capacidad de absorción de energía a través de su deformación en el impacto, gracias a su geometría.

Aunque la diferencia en el impacto frontal entre ambas señales es considerable, en ninguno de los cuatro casos el índice ASI es superior a uno. Por lo tanto, según viene indicado en la norma UNE EN 1317, los daños que sufrirían los ocupantes en cualquiera de los cuatro casos serían de tipo leve. Una vez comparados los resultados de los



impactos frontales, no se encuentra ninguna diferencia considerable entre los dos vehículos utilizados. La diferencia del índice ASI entre el vehículo tipo todo-terreno y el vehículo de tipo turismo es de 0,01, por lo tanto, es prácticamente despreciable.

Por el contrario, en el impacto lateral con la señal pequeña como con la señal grande, el índice ASI es diferente para ambos vehículos. El índice ASI es mayor con la señal grande, como pasaba en los impactos frontales, pero con menor diferencia. En ninguno de los cuatro casos el índice ASI es superior a uno, por lo tanto, según viene indicado en la norma UNE EN 1317, los daños que sufrirían los ocupantes en cualquiera de los cuatro casos serían de tipo leve.

En el impacto lateral con la señal pequeña, el índice ASI del vehículo tipo turismo es mayor al vehículo tipo todo-terreno con una diferencia de 0,053. Con la señal grande el vehículo tipo turismo sigue siendo mayor al vehículo tipo todo-terreno pero con una diferencia de 0,094. En los cuatro impactos laterales el vehículo todo-terreno obtiene mejor resultado y, por lo tanto, ocasionando menos daños a los ocupantes y al vehículo.

Como se ha podido observar, los dos vehículos tienen los mismos resultados en los impactos frontales, pero en los impactos laterales el vehículo tipo todo-terreno obtiene mejores resultados de índice ASI. Aunque el vehículo tipo todo-terreno obtiene mejores resultados en las simulaciones, todos los casos se encuentran dentro del tipo leve según la norma UNE EN 1317.



## **8. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS**

Los vehículos y las señales de tráfico empleados en este proyecto han sido proporcionados por “Nacional Crash Analysis Center”, por esta razón, la principal dificultad de este proyecto ha estado en definir las condiciones de contorno (velocidad de los vehículos y los contactos entre las superficies) que rodean a este tipo de problemas y que, debido a la complejidad de LS-PrePost no ha sido tarea fácil. Gracias a los tutoriales de “Livermore Software Technology Corporation”, se ha conseguido un manejo óptimo para conseguir una simulación con gran fidelidad y que los resultados obtenidos sean significativos de lo que sucede en una situación real.

Una vez realizado el proyecto se extraen tres conclusiones importantes, por un lado el gran potencial que ofrece LS-Dyna y LS-PrePost para simular impactos aproximándose bastante a la realidad, y lo importante de definir correctamente las condiciones de contorno. La tercera conclusión es referida al diseño y a la elección de los materiales de los vehículos y de las señales de tráfico. En los vehículos se pueden destacar su estructura monocasco autoportante y en las señales de tráfico la geometría de los postes como su sistema de sujeción, con el objetivo de absorber la máxima energía posible en



el impacto. De estos tres aspectos depende en gran medida la seguridad de los ocupantes del vehículo ante un posible impacto.

A partir de este proyecto es posible realizar varios trabajos futuros. Se puede realizar una variante de este proyecto, cambiando las propiedades de los materiales de las señales y de la estructura del vehículo para estudiar las diferencias en cada simulación. También se podrían realizar impactos oblicuos y traseros.

NCAC dispone de una gran variedad de modelos, donde incluyen varios tipos de vehículos de diferentes características (furgonetas, autobuses y camiones). Utilizando estos vehículos se puede realizar impactos frontales y laterales contra diferentes barreras y señales de tráfico.

Otra posibilidad sería estudiar un atropello. LSTC dispone de un dummy en el tutorial 6 que se podría utilizar en la simulación, en el cual tiene varios acelerómetros instalados en el cuerpo. Se podrían realizar varios casos a diferentes velocidades y ángulos de impacto.

Para terminar, otro estudio interesante sería implementar un dummy en un vehículo, teniendo en cuenta que la simulación necesitaría un ordenador avanzado. En esta simulación se podría analizar las diferencias de tener o no tener instalado un cinturón de seguridad y un airbag.



## **9. REFERENCIAS**

## **BIBLIOGRAFICAS**

- [1]. “Accidentes mortales en carretera año 2009”.[www.dgt.es](http://www.dgt.es). (Mayo 2010).
- [2]. “Livermore Software Technology Corporation”.[www.lstc.com](http://www.lstc.com). (Mayo 2010).
- [3]. “European New Car Assessment Programme”.[www.euroncap.com](http://www.euroncap.com). (Mayo 2010).
- [4]. “Sistemas de seguridad y confort en vehículos automóviles”, autor Albert Martí Parera, Editorial Marcombo, 2000.
- [5]. “Investigación de Accidentes de Tráfico, Estudio del automóvil”, autores Pablo Luque Rodríguez y Daniel Álvarez Mántaras, Editorial Universidad de Oviedo, 2003.
- [6]. “Manual de la técnica del automóvil”, autor Kart-Heinz Dietsche, Editorial Reverte, 2005.
- [7]. “LS-Dyna Theory Manual” Recopilado por John O. Hallquist. Editado por Livermore Software Technology Corporation, Marzo 2006.





- [8]. “Estudio del efecto del cinturón de seguridad y del airbag en el ocupante de un vehículo en caso de colisión” Manuel Moriche Guerrero. Proyecto fin de carrera de la Universidad Carlos III de Madrid, Julio 2008.
- [9]. “Nacional Crash Analysis Center”.[www.ncan.edu/vml/models.html](http://www.ncan.edu/vml/models.html). (Mayo 2010).
- [10]. “LS-DYNA Keyword User’s Manual, version 970” Livermore Software Technology corporation, Abril 2003.
- [11]. Artículo: “La Junta desarrollará una nueva señal de tráfico para prevenir accidentes”.[www.sevillaactualidad.com](http://www.sevillaactualidad.com). (8-Abril-2010).
- [12]. “Suggested restrictions of the Australian slip base sign posts”.[www.irfnews.org](http://www.irfnews.org). (5-Mayo-2008).
- [13]. “Contact modeling in LS-Dyna”.[www.dynasupport.com](http://www.dynasupport.com). (Mayo 2010).
- [14]. “Computational and experimental crash analysis of the road safety barrier”.[www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com). (5-Abril-2005).
- [15]. “Simulación de un choque frontal de un vehículo automóvil contra diferentes tipos de barrera” David Illescas Pérez. Proyecto fin de carrera de la Universidad Carlos III de Madrid, Octubre 2009.
- [16]. “LS-PrePost, Online Documentation, Tutorials”.  
[www.lstc.com/lsp/Content/tutorials.shtml](http://www.lstc.com/lsp/Content/tutorials.shtml). (Mayo 2010).
- [17]. “Investigación de Accidentes de Tráfico, Manual de reconstrucción”, autores Pablo Luque Rodríguez y Daniel Álvarez Mántaras, Editorial Universidad de Oviedo, 2006.
- [18]. “Simulación de ensayos de choque en vehículos: validación de un modelo dummy en 2 dimensiones” Jaime Condés Novillo. Proyecto fin de carrera de la Universidad Carlos III de Madrid, Julio 2005.